Diplomarbeit

Visualisierung eines Teilsystems der Energieversorgung auf Wasserstoffbasis am Beispiel eines Brennstoffzellen-Versuchsaufbaus

Michael Dammann
Matr.-Nr. 296541

August 2000

Fachhochschule Bielefeld
Fachbereich Elektrotechnik

Betreuende Dozenten:

Professor Dr.-Ing. Rolf Schwarze
Professor Dr.-Ing. Gerhard Weber

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Notwendigkeit neuer Energiekonzepte 2

3 Wasserstoffwirtschaft 6

3.1 Grundlagen zum Wasserstoff 6

3.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften 6

3.1.2 Energetische Eigenschaften 7

3.1.3 Sicherheitsrelevante Kenngrößen und Eigenschaften 7

3.1.4 Richtlinien und Normen zum Umgang mit Wasserstoff 10

3.2 Erzeugung von Wasserstoff 10

3.2.1 Konventionelle chemische Verfahren 10

3.2.2 Elektrolyse 13

3.2.3 Biologische Verfahren 15

3.2.4 Wasserspaltung durch thermochemische Kreisprozesse 16

3.2.5 Übersicht der Verfahren: 16

3.3 Weiterverarbeitung, Speicherung und Transport 17

3.3.1 Weiterverarbeitung von Wasserstoff 17

3.3.2 Speicherung 18

3.3.3 Transport 22

3.4 Anwendung von Wasserstoff 23

3.4.1 Nicht energetische Nutzung 23

3.4.2 Indirekt energetische Nutzung 23

3.4.3 Energetische Nutzung 24

3.5 Kosten für Wasserstoff 26

3.5.1 Herstellungskosten 26

3.5.2 Umwandlungskosten 27

3.5.3 Transport- und Verteilungskosten 28

3.5.4 Nutzenergiekosten 28

3.6 Zahlen zur Wasserstoffwirtschaft 29

3.6.1 Erzeugung 29

3.6.2 Verwendung 29

3.7 Bedeutung von Wasserstoff in der Energiewirtschaft 31

3.8 Solare Wasserstoffwirtschaft 32

4 Brennstoffzellen 35

4.1 Geschichtliche Entwicklung 35

4.2 Grundlagen der Brennstoffzelle 35

4.2.1 Umwandlungskette 35

4.2.2 Funktionsprinzip 36

4.2.3 Thermodynamik der elektrochemischen Energiewandlung 37

4.3 Wirkungsgrade 39

4.3.1 Theoretischer elektrischer Wirkungsgrad 39

4.3.2 Spannungswirkungsgrad 40

4.3.3 Stromwirkungsgrad 41

4.3.4 Gesamtwirkungsgrad 42

4.3.5 Wirkungsgradvergleich 42

4.4 Elektrodenkinetik 43

4.5 Kennlinien 45

4.5.1 Spannungs-Strom-Kennlinien 45

4.5.2 Leistungskurve 45

4.6 Eigenschaften von Brennstoffzellen *46*
4.7 Übersicht Zellentypen *48*
4.8 Anwendungen von Brennstoffzellen *49*

5 PEM-Zelle **51**
5.1 Aufbau der PEM-Zelle *51*
5.2 Betriebsdaten und Eigenschaften *54*
5.2.1 Abmessungen 54
5.2.2 Betriebstemperatur 54
5.2.3 Brenngasaufbereitung 54
5.2.4 Leistungsdaten 55
5.3 Anwendungsbereiche *55*
5.3.1 Mobile Anwendungen 55
5.3.2 Portable Anwendungen 57
5.3.3 Stationären Anwendungen 57
5.4 Perspektiven und Ausblick *58*

6 Konzeption zum Aufbau eines Brennstoffzellenmodells **60**
6.1 Zielsetzung und Anwendungsgebiete *60*
6.2 Marktanalyse *60*
6.3 Auswahlkriterien und Kaufentscheidung *62*
6.4 Konzeptioneller Aufbau *63*
6.5 Beschreibung der Bestandteile des Versuchsstandes *64*
6.5.1 Gasversorgung 64
6.5.2 Energiewandlung 66
6.5.3 Messeinrichtungen 69

7 Grundlegende Bedienungshinweise **71**
7.1 Aufbau und Handhabung des Brennstoffzellenmodells *71*
7.1.1 Montage des Wasserstoff-Gassystems 71
7.1.2 Handhabung der Zelle 72
7.1.3 Betriebsweisen der Gasversorgung 72
7.2 Inbetriebnahme *75*
7.2.1 Kurzcheck der Zelle 75
7.2.2 Anfahren der Anordnung 76
7.3 Hinweise zur Außerbetriebnahme *76*

8 Beschreibung der Messungen **77**
8.1 Messung von Kennlinien der Brennstoffzelle *78*
8.2 Wirkungsgradbestimmung *81*
8.3 Bestimmung der Leckrate des Systems *85*
8.4 Einflussgrößen der Kennlinie *87*
8.5 Wirkungsgrade eines Brennstoffzellensystems *90*
8.6 Maximale Leistung vs. Optimaler Wirkungsgrad *95*
8.7 Wechselbeziehung der Betriebsparameter einer Brennstoffzelle *98*
8.8 Lastprofile und Nutzungsgrad *101*
8.9 Systemantwort auf Lastwechsel *104*

9 Entwurf zur Präsentation und Kommunikation **107**

10 Zusammenfassung und Ausblick **109**

11 Literatur **110**

12 Anhang **114**

Abkürzungsverzeichnis

AFC	alkalische Brennstoffzelle (alcailc fuel cell)
ARGE	Arbeitsgemeinschaft
BHKW	Blockheizkraftwerk
C	Canada
C	Kohlenstoff
C_3H_8	Propan
CGH_2	gasförmiger Druckwasserstoff
CH	Schweiz
CH_4	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
D	Deutschland
e^-	Elektron
EIA	Energy Information Administration
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FH	Fachhochschule
GE	General Electric
GH_2	gasförmiger Wasserstoff
H	Wasserstoff
H/C-Verhältnis	Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnis
H^+	Wasserstoff-Ion
H_2	molekularer Wasserstoff
H_2O	Wasser
HotElly	Hochtemperatur-Elektrolyse
Hrsg.	Herausgeber
IEA	International Energy Agency
IFC	Inernational Fuel Cell
k.A.	keine Angabe
KOH	Kalilauge
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LH_2	Flüssigwasserstoff
MCFC	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (molton carbonate fuel cell)
MEA	Membran-Elektroden-Einheit (membrane-electrode-assembly)

NEA	Netzersatzanlage
NH_3	Ammoniak
O_2	Sauerstoff
PAFC	phosphorsaure Brennstoffezelle (phosphoric acid fuel cell)
PEMFC	Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (protone exchange membrane fuel cell)
PEV	Primärenergieverbrauch
PKW	Personen-Kraft-Wagen
SOFC	oxidkeramische Brennstoffzelle (solid oxide fuel cell)
Uni	Universität
USA	United States of America
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Formelzeichen

η	Wirkungsgrad
η_E	Energiewirkungsgrad
η_I	Stromwirkungsgrad
η_{Sys}	Systemwirkungsgrad
η_U	Spannungswirkungsgrad
η_U^*	Spannungswirkungsgrad bezogen auf den Heizwert
η_{rev}	theoretischer Wirkungsgrad
φ_{rev}	reversibles Potenzial
$\Delta^r G$	freie Reaktionsenthalpie
$\Delta^r H$	Reaktionsenthalpie
$\Delta^r S$	Entropieänderung
ΔU	Änderung der inneren Energie
ΔV	Volumenänderung
b	Tafelneigung
F	Faraday-Konstante
H_o	Brennwert
H_u	Heizwert
i	Stromdichte
I_{th}	theoretischer Strom
n	Anzahl der Elektronen
n	Anzahl der Zellen im Stack
p	Druck
Q	Wärmenergie
Q_{rev}	reversible Wärmeenergie
R	Widerstand
T	Temperatur
T_o	Anfangstemperatur
U_{Ho}	Gleichgewichtspannung bezogen auf den Brennwert
U_{Hu}	Gleichgewichtsspannung bezogen auf den Heizwert
U_k	Klemmenspannung
U_o	Leerlaufspannung
U_{rev}	theoretische Gleichgewichtsspannung

V^*	Volumenstrom
V_m	molares Volumen
W	verrichtete Arbeit
W_{el}	elektrische Arbeit
z	Anzahl der Elektronen je Teichenumsatz

Einheitenverzeichnis

° C	Grad Celsius
bar	Bar
cm/ s	Zentimeter pro Sekunde
cm^2/ s	Quadratzentimeter pro Sekunde
DM/ kW	Deutsch Mark pro Kilowatt
DM/ kW_{el}	Deutsche Mak pro Kilowatt elektrisch
g/ l	Gramm pro Liter
g/ mol	Gramm pro Mol
gH_2/ l	Gramm Wasserstoff pro Liter
J/ kg K	Joule pro Kilogramm und Kelvin
K	Kelvin
kg/ kW	Kilogramm pro Kilowatt
kg/ m^3	Kilogramm pro Kubikmeter
kJ/ kg	Kilojoule pro Kilogramm
km/ s	Kilometer pro Sekunde
kPa	Kilopascal
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWh/ kg	Kilowattstunde pro Kilogramm
kWh/ l	Kilowattstunde pro Liter
kWh/ Nm^3	Kilowattstunde pro Normkubikmeter
l/ h	Liter pro Stunde
m	Meter
m^3	Kubikmeter
mA/ cm^2	Milliampere pro Quadratzentimeter
mJ	Millijoule
MJ/ Nm^3	Megajoule/ pro Normkubikmeter
MW	Megawatt
mW/ cm^2	Milliwatt pro Quadratzentimeter
Nm^3	Normkubikmeter (bei Standardbedingungen Druck p = 1013 kPa und Temperatur T = 273,15 K = 0 °C)
Nm^3/ a	Normkubikmeter pro Jahr
Nm^3/ h	Normkubikmeter pro Stunde

Pf/ kWh	Pfennig pro Kilowattstunde
Pf/ Nm^3	Pfennig pro Normkubikmeter
PJ	Petajoule
ppm	points per million
t	Tonnen
t/ d	Tonnen pro Tag
Vol-%	Volumenprozent
vpm	value per million
W/cm^2	Watt pro Quadratzentimeter

1 Einleitung

Der nationale und globale Energiemarkt unterliegt einer alle Bereiche umfassenden und in den letzten Jahren sich stetig ausweitenden Umstrukturierung. Politische Entscheidungen wie der Ausstieg der Bundesrepublik Deutschland aus der Atomenergie auf nationaler Ebene, die Entmonopolisierung der europäischen Strom- und Gasmärkte oder die Absichtserklärungen internationaler Regierungsvertreter auf weltweiten Klimagipfeln sind eine Ursache für die Umgestaltung der bisherigen Strukturen in der Energiebereitstellung, -verteilung und -nutzung. Aber auch ein wachsendes ökologisches Bewusstsein in der Bevölkerung und ökonomische Betrachtungen bilden den Nährboden für die Entwicklung und Marktdurchdringung neuer Energieerzeugungs- und Energiewandlungs-Techniken. Die Akzeptanz bei den Menschen und der Wissensstand über neuen Technologien erweisen sich in der Durchsetzung neuer Konzepte als Multiplikator.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine möglicherweise in Zukunft weit verbreitete chemische Energieumwandlung mittels Brennstoffzellen in die Ingenieurausbildung an der Fachhochschule Bielefeld, Fachbereich Elektrotechnik, zu implementieren. Die Veranschaulichung dieser Technologie soll sowohl theoretisch als auch praktisch durch Messungen an einem Experimentiersystem erfolgen.

Am Anfang der Arbeit steht eine umfangreiche Marktanalyse der Hersteller und Lieferanten von Brennstoffzellensystemen. Die Produktpalette wurde auf geeignete Komponenten zur Umsetzung des Experimentiersystems untersucht. Die theoretische Ausarbeitung charakterisiert zunächst Wasserstoff als Rohstoff und Energieträger und gibt einen Überblick über die heutige Wasserstoffwirtschaft. Des weiteren wird ein Ausblick auf die Struktur einer zukünftig möglichen solaren Wasserstoffwirtschaft gegeben. Die Theorie, die Funktionsweise und das Betriebsverhalten von Brennstoffzellen wird allgemein und speziell am Beispiel einer PEM-Brennstoffzelle vermittelt. Zur Untermauerung der theoretischen Kenntnisse werden praktische Messungen an einem Versuchsstand demonstriert. Ein Entwurf zur Kommunikation und Vermittlung der Technologie auf Messen, Ausstellungen und Tagungen durch Energieversorgungsunternehmen rundet die Arbeit ab. Eine ausführliche Betrachtung des Marketings und der Kommunikation des Experimentiersystems wird in einer gesonderten Abhandlung erfolgen.

Das Projekt ist eine Kooperation der Fachhochschule Bielefeld, der PESAG AG, Paderborn und der ENEX AG, Paderborn. Die Fachhochschule Bielefeld als Projektinitiator verfolgt vorrangig das Ziel, die Brennstoffzellen-Technologie in die Ingenieurausbildung zu integrieren. Die Kommunikation und Präsentation der Technologie auf Fachtagungen, Kongressen, Messen etc. mittels eines Demonstrationsmodells ist das Bestreben der Energiedienstleistungsunternehmen in der Projektpartnerschaft.

Die FH Bielefeld, die PESAG AG und die ENEX AG bilden die Arbeitsgemeinschaft (ARGE) Energiekompetenz Ostwestfalen-Lippe. 1999 gewann die ARGE den Energie Management Award für das fortschrittlichste Kundenbindungskonzept. Das vorliegende Projekt ist ein Baustein in der Weiterentwicklung des Kundenbindungs- und Ausbildungskonzept der ARGE.

2 Notwendigkeit neuer Energiekonzepte

Die Liberalisierung der Energiemärkte für Strom und Gas verändert zur Zeit massiv die Struktur der Energiewirtschaft im europäischen Raum. Aber auch die nationale, europäische und weltweite Energiepolitik hat einen starken Einfluss auf die Rahmenbedingungen für die globale Energiewirtschaft und somit Konsequenzen für das Verhalten aller Konsumenten von Energie. Sowohl die Industrie, aber auch Privatpersonen, werden mit den Auswirkungen einer zukünftigen Energiepolitik konfrontiert.

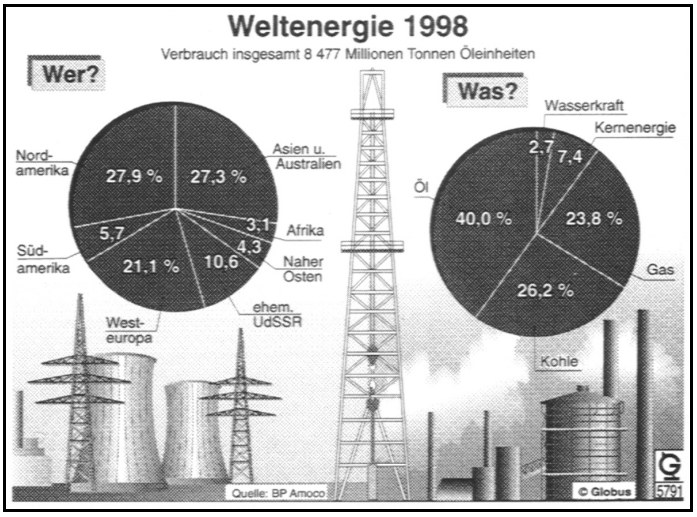

Abbildung 2.1: Weltweiter Primärenergieverbrauch 1998 [birol,99]

Der weltweite Primärenergieverbrauch (PEV) lag 1998 bei rund $356 \cdot 10^3$ PJ [birol,99]. In Deutschland wurden im gleichen Jahr 14.320 PJ Energie benötigt [bmwi,99]. Dabei stützt sich die Erzeugung von Energie sowohl in Deutschland als auch weltweit hauptsächlich auf die fossilen Energieträger Öl, Gas und Kohle. Allein Erdöl besitzt für beide räumlichen Betrachtungen Anteile von 40 % am Gesamtenergieverbrauch. Die fossilen Energieträger werden durch Verbrennung in Wärme und/ oder Elektrizität umgewandelt. Nur geringe Anteile des Energiebedarfs werden heute aus regenerativen Energiequellen gedeckt. Weltweit dominiert die Wasserkraftnutzung dieses Segment. Größere Anteile als die erneuerbaren Energien am PEV besitzt die Kernenergie, die aber aus sicherheitstechnischen Gründen und einer nicht gelösten Endlagerung der radioaktiven Abfälle nicht unbedenklich erscheint. Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 zeigen den Energiemix zur Deckung des weltweiten und des deutschen Primärenergieverbrauchs.

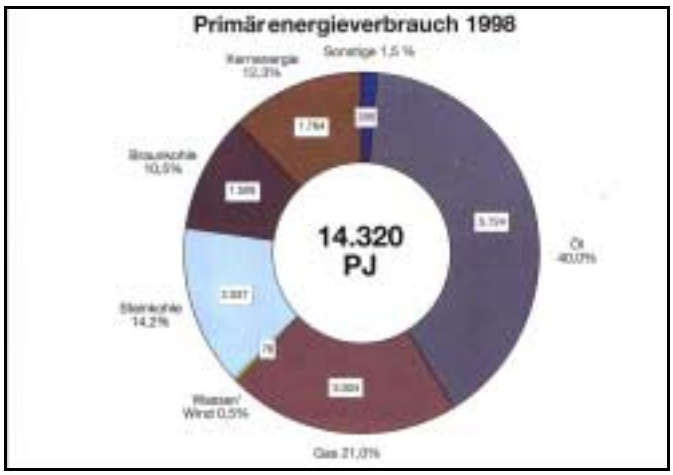

Abbildung 2.2: Primärenergieverbrauch Deutschlands 1998 [bmwi,99]

Laut Prognosen der International Energy Agency (IEA), der Energy Information Administration (EIA) und des International Institute for Applied System Analysis wird der Weltenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 um weitere 60 % steigen [schlesinger,00]. In den Industriestaaten geht man von einer Stagnation bzw. einer leichten Reduktion des Energiebedarfs bis 2020 aus. Um so dramatischer wird der Energieverbrauch für die asiatischen Staaten prognostiziert. Die zunehmende Technisierung und Mobilisierung der Menschen in den Schwellenländern führt zu einer Angleichung des Pro-Kopf-Energieverbrauchs von derzeit weniger als 30 kWh pro Person und Tag an das Niveau der Industriestaaten im Bereich von 90 bis 220 kWh pro Person und Tag [hein,96]. Das stetige Bevölkerungswachstum in diesen Regionen ist ein weiterer Multiplikator für den dramatischen Anstieg des Weltenergieverbrauchs. Im letzten Jahrhundert hat sich die Weltbevölkerung von 1,5 Mrd. auf rund 6 Mrd. Menschen vervierfacht. Allein in den 90-er Jahren ist die Zahl der Menschen um 16 % gewachsen. Die Hälfte der 6 Mrd. Erdenbürger lebt zur Jahrtausendwende in Städten. Prognosen gehen von einem jährlichen Bevölkerungswachstum von ca. 1,7 % aus, was bedeutet, dass alle 10 bis 15 Jahre eine weitere Milliarde Menschen die Erde bewohnen werden. Diese Daten und Prognosen werden eine zentrale Bedeutung für die globale Energieversorgungsstruktur haben [czak,99].

Der wachsende Weltenergieverbrauch und die Endlichkeit der fossilen Energieträger lässt die zeitliche Verfügbarkeit der fossilen Energiequellen sinken. Die Zahlen schwanken je nach Verfasser, Annahmen und Intention der Prognose, zwischen einigen Jahrzehnten und Jahrhunderten für die jeweiligen Energieträger. Unabhängig von genau prognostizierten Zahlen ist aber absehbar, dass die Erdöl- und Erdgasressourcen die ersten sein werden, die nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Reichweiten von Erdgas und Erdöl liegen in der Größenordnung von 50 Jahren. Stein- und Braunkohle sowie Uran weisen größere Reichweiten im Bereich von 100 bis 300 Jahren auf. Die fossilen Energiequellen werden zwar nicht in den nächsten Jahrzehnten versiegen, trotzdem wird es schon in einem absehbaren Zeitraum zu einer Verknappung der Rohstoffe kommen. Die globale Konzentration der Lagerstätten auf bestimmte, meist politisch instabile Regionen birgt zusätzlich die Gefahr einer erhöhten politischen und wirtschaftlichen Abhängigkeit von diesen Regionen und könnte sich zu einem globalen Sicherheitsrisiko entwickeln.

Neben der abzusehenden Ressourcenknappheit werden sich die Menschen in den kommenden Jahrzehnten vielmehr mit den klimatischen Auswirkungen unseres derzeitigen Energieverbrauches beschäftigen müssen. Der Anstieg des globalen PEV geht einher mit steigenden Emissionen. Besonders das Treibhausgas Kohlendioxid (CO_2), welches bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Energieträger entsteht, wird derzeit weltweit diskutiert. Der anthropogene Treibhauseffekt wird zu 50 % diesem Gas zugeschrieben. 1999 wurden weltweit 24 Mrd. Tonnen Kohlendioxid freigesetzt. Nordamerika, China, Japan, die GUS-Staaten und Europa emittieren fast 2/3 des gesamten Kohlendioxids. Wobei in den meisten dieser Staaten ein weiterer Zuwachs vorhergesagt wird. Allein in China stieg der CO_2-Ausstoß von 1990 bis 1997 um 34 % [bmwi,99]. Die Bundessrepublik verursacht mit 859 Mio. Tonnen für das Jahr 1999 einen Anteil von ca. 4 % der weltweiten CO_2-Emssionen [schiffer,00]. Abbildung 2.3 gibt Aufschluss über die globale Verteilung der energiebedingten CO_2-Emissionen.

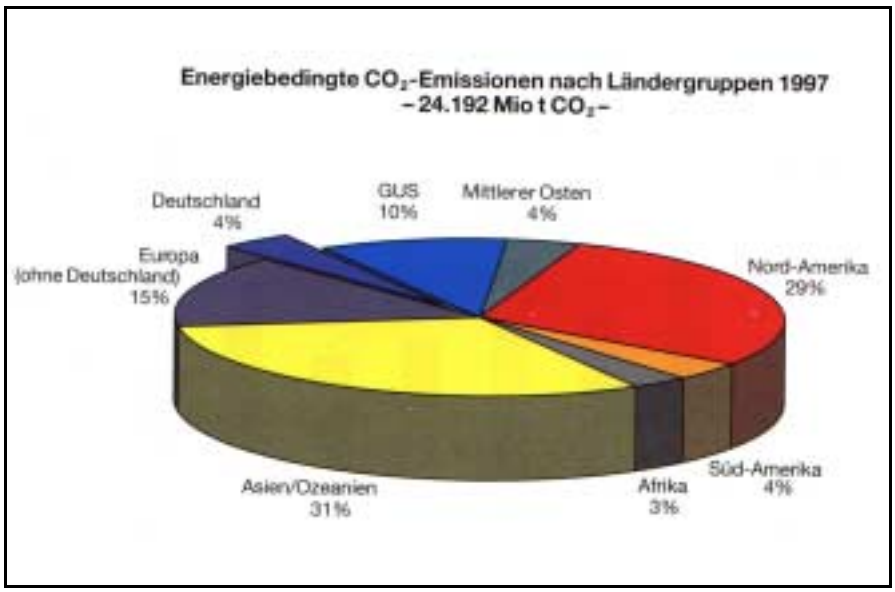

Abbildung 2.3: Globale Verteilung der Kohlendioxid-Emissionen 1997 [bmwi,99]

Tabelle 2.1 zeigt die Entwicklung der CO_2-Emissionen der Bundesrepublik für die jeweiligen Verbrauchsektoren und Energieträger im Zeitraum von 1990 bis 1999.

	1990	**1995**	**1998**	**1999**
Nach Emittentengruppen	Mio t			
Kraft- und Fernheizkraftwerke [1)]	397	349	339	325
Industriefeuerungen [2)]	213	158	148	145
Straßenverkehr	150	165	168	173
Übriger Verkehr [3)]	22	18	18	18
Private Haushalte	128	129	136	125
Handel/ Gewerbe/ Dienstleistungen [4)]	76	58	52	48
Summe energiebedingte Emissionen	***986***	***877***	***861***	***834***
Industrieprozesse [5)]	28	26	25	25
Insgesamt	*1.014*	*903*	*886*	*859*
Nach Energieträgern	Mio t			
Mineralöl	300	320	318	308
Steinkohle	182	178	172	161
Braunkohle	343	193	170	165
Naturgase	115	145	157	158
Sonstige Energieträger [6)]	47	41	43	42
Summe energiebedingte Emissionen	***987***	***877***	***860***	***834***

[1)] bei Industriekraftwerken nur Stromerzeugung
[2)] übriger Umwandlungsbereich, verarbeitendes Gewerbe und übriger Bergbau, Erdgasverdichterstationen, bei Industriekraftwerken nur Wärmeerzeugung
[3)] Land-, Forst- und Bauwirtschaft, Militär-, Schienen-, Küsten- und Binnenschiffsverkehr, nationaler Luftverkehr
[4)] einschließlich militärische Dienststellen
[5)] ohne energiebedingte Emissionen
[6)] insbesondere Flüssiggas/ Raffineriegas sowie Stadt-/ Kokerei-/ Gichtgas

Tabelle 2.1: CO_2-Emissionen der Bundesrepublik nach Verbrauchssektoren und Energieträgern [schiffer,00]

Im Zeitraum von 1990 bis 1999 sind die CO_2-Emissionen Deutschlands kontinuierlich um insgesamt 155 Mio. t oder 15,5 % gesunken. Verglichen zum Vorjahr sank die Kohlendioxid-Emission in 1999 um 3 %. Hauptverantwortlich für diese Entwicklung ist neben umgesetzten Energieeinsparungen die Substitution kohlenstoffhaltiger Energieträger wie Braun- und Steinkohle durch kohlenstoffärmere wie Erdgas oder Erdöl. Die Modernisierung des Kraftwerksparks und der Hausenergieversorgungen in Ostdeutschland nach der Wiedervereinigung hat zu einer deutlichen Minderung des CO_2-Ausstoßes geführt. Die Witterungseinflüsse auf den Schadstoffausstoß durch kalte oder warme Wintermonate werden in den schwankenden Zahlen der privaten Haushalte deutlich.

Die CO_2-Probematik wurde 1992 auf dem Umweltgipfel in Rio de Janeiro erstmals weltweit diskutiert und eine Klimarahmenkonvention beschlossen. Auf 5 weiteren Konferenzen (Berlin 95, Genf 96, Kyoto 97, Buenos Aires 98, Bonn 99) wurde in zähen Verhandlungen versucht, die 1992 verfasste Rahmenkonvention in konkrete Reduktionszahlen und -maßnahmen umzusetzen. Die ersten verbindlichen Reduktionsziele und –zahlen für die Hauptverursacher, die Industriestaaten, wurden 1997 in Kyoto beschlossen. In diesem Zusammenhang hat sich die Bundesrepublik Deutschland zu einer Minderung des CO_2-Ausstoßes um 25 % zum Referenzjahr 1990 verpflichtet. Neben den schon realisierten Senkungen muss Deutschland bis 2005 noch weitere 10 % oder 100 Mio. t Kohlendioxid einsparen, um die eingegangene Verpflichtung zu erfüllen. Ein Vergleich der noch einzusparenden Menge an Emissionen mit den heutigen Emissionen der einzelnen Verbrauchssektoren soll die notwendige Anstrengung verdeutlichen. Die Summe der noch zu realisierenden Einsparung liegt im Bereich von 1/3 der derzeitigen Kraftwerksemissionen, der Hälfte des Straßenverkehrs oder fast dem ganzen Segment der privaten Haushalte (vgl. Tabelle 2.1). Diese Reduktionen sind nicht mehr nur durch eine Steigerung der Energieeffizienz und einer Entkarbonisierung in der Energiewirtschaft zu erreichen. Vielmehr wird die Forderung nach einer Senkung des Gesamtenergieverbrauchs und einer zwingend erforderlichen Marktdurchdringung neuer kohlenstofffreier, emissionsloser Energiekonzepte deutlich.

Eine weltweit deutliche Senkung der CO_2-Emissionen ist nur durch eine Substitution einer kohlenstoffhaltigen durch eine kohlenstofffreie Energiewirtschaft möglich. Der Ausbau von regenerativen Energiesystemen ist auf diesem Entwicklungsweg ein unverzichtbares Instrument. Das diskontinuierliche Energieangebot der erneuerbaren Energietechniken zur zeitlich versetzten Energienachfrage stellt derzeit weltweit ein Problem dar. Wasserstoff verkörpert in dieser Situation einen geeigneten Energiespeicher. Das Speichermedium kann mittels regenerativer Energiequellen durch Elektrolyse gewonnen, zum Einsatzort transportiert und vor Ort gespeichert werden. Die Brennstoffzellentechnologie bietet die Möglichkeit am Einsatzort aus dem Wasserstoff wieder elektrische Energie zu generieren. Die Option den Wasserstoff zunächst aus fossilen Energieträgern zu gewinnen erleichtert einen angepassten, fließenden Übergang in eine emissionsfreie Wasserstoffwirtschaft. Einhergehend mit der technischen Entwicklung muss allerdings die Problematik eines zu hohen globalen Energieverbrauches gelöst werden. Dieses erscheint durch eine fortwährende Steigerung von Wirkungsgraden und der Energieeffizienz in der Energieanwendung lösbar. Der Weg in eine solare Wasserstoffwirtschaft zur Bewahrung unseres Klimas ist gezeichnet. Das Beschreiten dieses Weges benötigt aber noch große Anstrengungen in Bezug auf die technische Umsetzung, die ökonomische Integration und der Akzeptanz der Technologie.

3 Wasserstoffwirtschaft

3.1 Grundlagen zum Wasserstoff

Wasserstoff wird heute bereits schon als Rohstoff und Energieträger im Wirtschaftskreislauf eingesetzt. Zur objektiven Beurteilung der Eigenschaften, der Risiken und der Anwendung von Wasserstoff wird im folgenden ein Vergleich mit den Brenngasen Methan (CH_4) und Propan (C_3H_8), sowie gegebenenfalls weiteren Energieträgern angestrebt. Die konventionellen, weit verbreiteten Energieträger stehen in unmittelbarer Konkurrenz zum Wasserstoff und nur der direkte Vergleich ermöglicht Aussagen über eine mögliche Integration des Wasserstoffs in die Energiewirtschaft [zittel,96].

3.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften

Wasserstoff ist das häufigste Element im Weltall. Er stellt über 90 Prozent aller Atome und ¾ der gesamten Masse. Das Wasserstoffatom ist das einfachste und leichteste. Es besteht aus einen Proton und einem Elektron. Das chemische Symbol H steht für Hydrogenium, d.h. „Wasserbildner“ [weber,91]. In der Natur kommt Wasserstoff wegen seiner hohen chemischen Aktivität nur in seltenen Fällen, z.B. in höheren Schichten der Atmosphäre als ungebundenes Element vor. Der weitaus größte Teil tritt in chemischen Verbindungen wie Wasser, Säuren, organischen Stoffen oder Mineralien auf. Wasserstoff-Verbindungen sind in nahezu unbegrenzten Mengen auf der Erde vorhanden. Aus den Verbindungen können Wasserstoffmoleküle (H_2) herausgelöst werden. Unter Normalbedingungen ist Wasserstoff ein farb-, geruchs- und geschmackloses Gas. Es ist ungiftig und nur seine Eigenschaft Sauerstoff zu verdrängen, stellt für den Menschen eine unmittelbare Gefahr dar. Das Gas ist aufgrund seiner geringen Dichte ca. 14 mal leichter als Luft und steigt schnell in höhere Luftschichten auf. In Tabelle 3.1 sind einige wichtige physikalische und chemische Kennzahlen von Wasserstoff und vergleichbaren Brenngasen dargestellt.

Eigenschaft	Einheit	Wasserstoff	Methan (Erdgas)	Propan
Chem. Zeichen:		H_2	CH_4	C_3H_8
Molare Masse:	g/mol	2,016	16,043	44,097
Dichte	kg/m^3	0,08988	0,7175	2,011
Gaskonstante	J/kgK	4124	518,8	188,5
Siedepunkt bei 1,013 bar:				
Temperatur	K	20,3	111,6	231,1
Flüssigkeitsdichte	g/l	70,8	422,5	580,7
Gasdichte	g/l	13,38	1,82	2,42
Kritischer Punkt:				
Temperatur	K	33,0	190,6	369,8
Druck	bar	12,9	46,0	42,4
Dichte	g/l	31,4	162,2	218,7
Heizwert:	kJ/kg	119.972	50.020	46.350
	kWh/ kg	33,33	13,90	12,88
	MJ/Nm^3	10,783	35,882	93,215
	kWh/Nm^3	2,995	9,968	25,893
Brennwert:	kJ/kg	141.890	55.530	50.410
	kWh/ kg	39,41	15,42	14,00
	MJ/Nm^3	12,745	39,819	101,242
	kWh/Nm^3	3,509	11,061	28,123

Tabelle 3.1: Physikalische und chemische Kennzahlen [schmidt1,00], [linde2,00]

3.1.2 Energetische Eigenschaften

Wasserstoff als Energieträger tritt in Konkurrenz zu den bereits schon lange Zeit eingesetzten Energieträgern wie Erdgas, Propan oder konventionellen Treibstoffen. In den Anwendungsgebieten der jeweiligen Energieträger sind die gewichts- und volumenspezifischen Energiedichten des Energieträgers von Bedeutung. In Tabelle 3.2 sind die massen- und volumenbezogenen Energiedichten verschiedener Brenngase und Treibstoffe in unterschiedlichen Speicherformen bezogen auf den Heizwert aufgeführt [zittel,98].

Energieträger	Speicherform	Massenbezogene Energiedichte [kWh/kg]	Volumenbezogene Energiedichte [kWh/l]
Wasserstoff	Gas 200 bar	33,3	0,53
	Gas 248 bar	33,3	0,64
	Gas 300 bar	33,3	0,75
	Flüssig mit –273 °C	33,3	2,36
	Metallhydrid	0,58	3,18
Erdgas	Gas 200 bar	13,9	2,58
	Gas 248 bar	13,9	3,01
	Gas 300 bar	13,9	3,38
	Flüssig mit –162 °C	13,9	5,8
Propan	Flüssig	12,9	7,5
Methanol	Flüssig	5,6	4,42
Benzin	Flüssig	12,7	8,76
Diesel	Flüssig	11,6	9,7

Tabelle 3.2: Energiedichten verschiedener Energieträger und Speicherformen [zittel,98]

Ein Vorteil von Wasserstoff gegenüber konventionellen Brennstoffen liegt in der spezifischen Energiedichte pro Masseneinheit. 1 kg Wasserstoff enthält mehr als doppelt so viel Energie wie 1 kg Erdgas oder fast dreimal so viel Energie wie 1 kg Diesel. Der Energiegehalt von Wasserstoff pro Volumeneinheit hingegen kann mit dem anderer Brennstoffe nicht mithalten. Die bisherige Anwendung von Wasserstoff als Energieträger spezialisiert sich aus diesem Grund auf die Bereiche, in denen das zu transportierende Gewicht von Bedeutung ist, z. B. in der Raumfahrt oder im militärischen Bereich. Um in Einsatzgebiete vorstoßen zu können in denen das nutzbare Speichervolumen dominiert, sind neue Speicherformen von Wasserstoff in der Entwicklung. Die massenspezifische Energiedichte von flüssigem Wasserstoff (LH_2) oder von Wasserstoff in einem Metallhydridspeicher liegt schon im Bereich von Erdgas. Um einen aussagekräftigen Vergleich der Brennstoffe in der Anwendung anstellen zu können, sollten aber die gesamten Speichergewichte und nicht nur die reinen Brennstoffgewichte berücksichtigt werden.

3.1.3 Sicherheitsrelevante Kenngrößen und Eigenschaften

Zur Abschätzung der Risiken und Sicherheitsprobleme des Energieträgers Wasserstoff sind die sicherheitstechnisch wichtigen physikalischen und chemischen Eigenschaften verschiedener Brenngase in Tabelle 3.3 zusammen gefasst.

Bezeichnung	Einheit	Wasserstoff	Methan	Propan
Chemisches Zeichen		H_2	CH_4	C_3H_8
Stochiometrisches Gemisch in Luft	Vol.-%	29,53	9,48	4,03
Flammentemperatur in Luft [2]	K	2.318	2.148	2.385
Selbstentzündungstemperatur	K	858	813	760
Zündgrenzen in Luft (Anteil H_2)	Vol.-%	4,0 – 75,0	5,3 – 15,0	2,1 – 9,5
Min. Zündenergie in Luft	mJ	0,02	0,29	0,26
Max. Verbrennungsgeschwindigkeit [1]	cm/s	346	43	47
Gemisch bei max. Verbrennungsgeschwindigkeit	Vol.-%	42,5	10,17	4,27
Normale Verbrennungsgeschwindigkeit [2]	cm/s	237	42	46
Detonationsgrenzen in Luft	Vol.-%	13 – 59	6,3 – 14	k. A.
Detonationsgeschwindigkeit in Luft [2]	km/s	2,0	1,8	1,85
Detonationsüberdruck [2]	bar	14,70	16,80	18,25
Diffusionskoeffizient [1]	cm^2/s	0,61	0,16	0,12

[1] NTP-Bedingung: Normaltempertaur 293,15 K; Normaldruck 1,013 bar
[2] Stochiometrisches Gemisch

Tabelle 3.3: Sicherheitstechnische Kenngrößen [winter,89], [schmidt3,00], [linde2,00]

Stochiometrisches Gemisch:
Das stochiometrische Gemisch gibt das Massenverhältnis der Reaktanten einer chemischen Verbindung an, bei der die quantitativen Gesetze der Chemie erfüllt sind. Bei der chemischen Verbindung Wasserstoff-Luft liegt das stochimetrische Gemisch bei einem Wasserstoffanteil von 29,53 %. Bei der Reaktion werden 29,53 Gewichtanteile Wasserstoff und 70,47 Gewichtsanteile Luft benötigt, um die quantitativen chemischen Gesetze der Reaktion zu erfüllen.

Flammentemperatur und Selbstentzündungstemperatur:
Die Flammentemperaturen der stochiometrischen Brenngasgemische unterscheiden sich nur wenig voneinander. Wasserstoff brennt in Luft bei einem Volumenanteil von 29 % mit einer Temperatur von 2.318 K. In einer reinen Sauerstoffatmosphäre können für Wasserstoff Verbrennungstemperaturen von 3.000 K erreicht werden. Die geringfügig höhere Flammentemperatur von Wasserstoff hat auf den Sicherheitsaspekt wenig Einfluss. Vielmehr ist sie für die Materialauswahl der Wasserstoff verarbeitenden Anlagen von Bedeutung. Die Selbstentzündungstemperaturen der Brenngase Propan und Methan liegen bei 760 K bzw. 813 K. Mit 858 K liegt die Selbstentzündungstemperatur von Wasserstoff nur unwesentlich höher.

Zündgrenze:
Um ein Gas zu entzünden ist ein bestimmtes Mischungsverhältnis mit Luft und eine Zündquelle mit ausreichender Zündenergie notwendig. Das entzündbare Mischungsverhältnis von Gas zu Luft wird als Zündgrenze bezeichnet und gibt die Anteile des Gases in der Luft an. Außerhalb der Zündgrenze ist keine selbstständige Flammenfortpflanzung möglich. Unterhalb der Grenze ist zu wenig Brenngas und oberhalb zu wenig Sauerstoff im Gas-Luft-Gemisch vorhanden. Das reine Brenngas ist also nicht zündfähig. Der Vergleich von Wasserstoff mit anderen Brenngasen zeigt, dass Wasserstoff einen sehr weiten Zündbereich von 4,1 – 72,5 Vol.-% besitzt. Aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten ein Nachteil. Allerdings wird die Abweichung im Vergleich besonderes in der oberen Zündgrenze deutlich. Von entscheidender Bedeutung zur Beurteilung der Sicherheit ist die untere Zündgrenze. In der Verwendung von Wasserstoff ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass Wasserstoff in eine

Luftumgebung einströmt und sich dort entzündet, als das Eindringen von Luft in eine Wasserstoffumgebung und die dortige Entzündung. In der Praxis ist im Störfall meist eine Zündquelle mit ausreichender Zündenergie vorhanden, so dass sich das Gas schon vor Erreichen der oberen Zündgrenze entzündet.

Minimale Zündenergie:
Die bei Wasserstoff minimal notwendige Zündenergie von 0,02 mJ ist um eine Größenordnung kleiner als bei den anderen Brenngasen, deren Werte bei 0,26 bzw. 0,29 mJ liegen. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die erzeugten Zündenergien von weichen Zündquellen wie Funken bei Schaltern oder Motoren und elektrostatischen Funkenentladungen, so liegen diese weit über den angegebenen minimalen Zündenergien der Brenngase. Schon die elektrostatische Entladung des menschlichen Körpers besitzt eine Energie von ca. 10 mJ. In einem Störfall wird sich ohne explizite Maßnahmen zur Verhinderung möglicher Zündquellen jedes Brenngas-Luft-Gemisch der entsprechenden Konzentration entzünden.

Verbrennungsgeschwindigkeit:
Eine fundamentale Kennzahl zur Beurteilung der Sicherheit eines brennbaren Gasgemisches ist die Verbrennungsgeschwindigkeit. Je höher diese ist, desto größer ist die Tendenz eines Übergangs von einer Deflagration (Verpuffung) zur Detonation. Dieser Umschlag erfolgt aber nur bei genügend langen Wegstrecken z.B. in Räumen oder Rohren. Die Verbrennungsgeschwindigkeit ist nicht mit der Flammenfrontgeschwindigkeit zu verwechseln, die die Summe aus der Verbrennungsgeschwindigkeit und der Verdrängungsgeschwindigkeit des unverbrannten Gasgemisches angibt. Die hohen Verbrennungsgeschwindigkeiten des Wasserstoffs gegenüber anderen Brenngasen bilden das Hauptproblem der Sicherheitstechnik. Um einen Übergang von gewollten Verbrennungsvorgängen zur ungewollten Detonation vor allem in Räumen und langen Rohren zu vermeiden, können konstruktive Maßnahmen ergriffen werden.

Detonationsgrenze:
Reiner Wasserstoff ist nicht explosiv. Nur Gas-Luft-Gemische in bestimmten Konzentrationen sind explosionsfähig. Die Detonationsgrenze gibt die Brenngaskonzentrationen an, die unter Einwirkung einer Zündenergie detonieren. Im Gegensatz zur Deflagration verläuft eine Detonation mit wesentlich höherer Geschwindigkeit (ca. 2 km/s) und scharfen, großen Druckwellen (ca. 16 bar Überdruck). Eine Detonation hat zerstörerischen Einfluss auf die Umgebung. Auch bei den Detonationsgrenzen ist die untere Grenze zur Beurteilung eines potenziellen Sicherheitsrisikos aus den genannten Gründen (vgl. Zündgrenzen) heran zu ziehen. Die untere Detonationsgrenze von Wasserstoff liegt bei 13 Vol.-%. Methan detoniert schon bei weitaus geringeren Gasanteilen von 6,3 Vol.-%. Dafür ist aber der Detonationsbereich von Wasserstoff im Vergleich zu Methan bis zu einer oberen Grenze von 59 Vol.-% wesentlich ausgedehnter. Unter realistischen Bedingungen werden die oberen Detonationsbereiche ohne vorherige Zündung allerdings nur in Ausnahmen erreicht.

Diffusionskoeffizient:
Der Diffusionskoeffizient von Wasserstoff liegt etwa 4 mal höher als der von Methan. Somit mischt sich Wasserstoff wesentlich schneller mit Luft als andere Brenngase. Im Freien ist dies von Vorteil, da sich die kritischen Gas-Luft-Gemische sehr schnell verdünnen und unter die Zünd- bzw. Detonationsgrenzen fallen. In geschlossenen, schlecht gelüfteten Räumen ist diese Eigenschaft von Nachteil, da sich wesentlich schneller gefährliche Gas-Luft-Gemische bilden können und die Gefahr einer Entzündung bzw. Detonation steigt.

3.1.4 Richtlinien und Normen zum Umgang mit Wasserstoff

Als komprimiertes oder tiefkalt verflüssigtes Gas fällt Wasserstoff unter die entsprechenden einschlägigen Regelwerke für brennbare Gase. In Deutschland existiert kein nationales, wasserstoffspezifisches Regelwerk, da keine besonderen Gefahren von ihm ausgehen. Normungsbedarf besteht in absehbarer Zeit durch die Einführung als Treibstoff in den Verkehr (Zulassungsvorschriften). Auch die Entwicklung neuer Materialien für Speicherbehälter und neuen Speicherformen bedarf einer sicherheitstechnischen Betrachtung in entsprechenden Normen, wie dies bisher auch für die schon verbreitete Speicherung in Stahlflaschen der Fall ist [schmidt2,00]. In „Wasserstoff in der Energiewirtschaft“ [zittel,96] ist eine umfangreiche Zusammenstellung der anwendbaren nationalen Regelwerke für alle Bereiche der Wasserstoffwirtschaft aufgeführt.

3.2 Erzeugung von Wasserstoff

In der Natur kommt der Energieträger Wasserstoff nicht in ungebundener Form vor. Er muss erst prozesstechnisch erzeugt werden. Wasserstoff gilt somit als Sekundärenergieträger. Die Produktion von Wasserstoff kann unter Verwendung von Primär- oder Sekundärenergieträgern erfolgen. Werden Primärenergieträger wie Erdgas, Kohle oder Erdöl eingesetzt, dienen diese als Kohlenstofflieferant und meist zugleich als externe Energiequelle. Die Verwendung von Sekundärenergieträgern wie Strom oder Methanol differenziert man weiterhin noch nach dem Ursprung des Sekundärenergieträgers. Der Bereitstellung dieser Energie können ebenfalls Primärenergieträger oder regenerative Energiequellen zu Grunde liegen. In der Erzeugung von ungebundenen Wasserstoff unterscheidet man prinzipiell vier verschiedene Verfahren [zittel,96]:

- Konventionelle chemische Verfahren
- Elektrolyse
- Kreis- und Hybridprozesse
- Biologische Prozesse

3.2.1 Konventionelle chemische Verfahren

Die konventionellen chemischen Verfahren zur Produktion von Wasserstoff beruhen auf Redoxreaktionen, in denen Wasser mit Kohlenstoff oder Kohlenmonoxid reagiert. Die Primärenergieträger wie Erdgas, Erdöl oder Kohle dienen bei diesen Verfahren vornehmlich als Kohlenstofflieferant. Häufig wird der eingesetzte Primärenergieträger aber auch zur notwendigen externen Energiezufuhr genutzt. Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die konventionelle chemische Prozesstechnik.

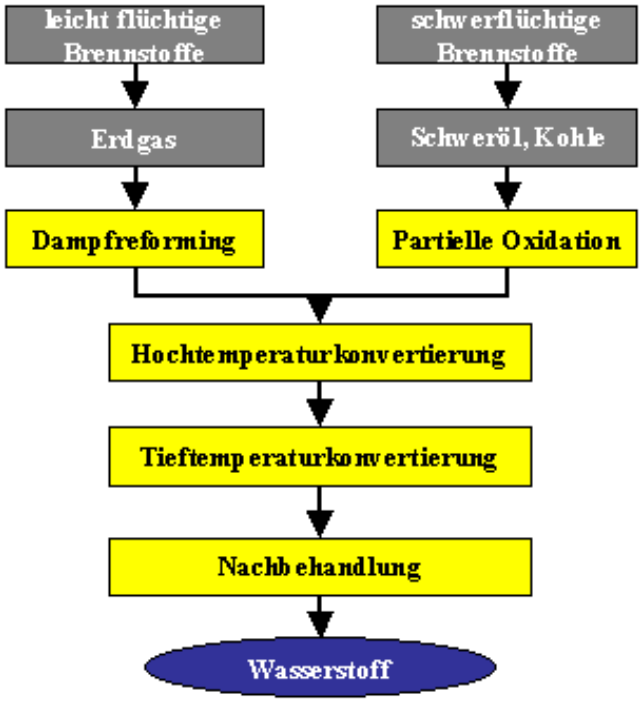

Abbildung 3.1: Konventionelle chemische Prozesstechnik

Dampfreforming von Erdgas:
Das Dampfreforming ist eine endotherme katalytische Umsetzung von leichten Kohlenwasserstoffen, wie z. B. Methan mit Wasserdampf. In großtechnischen Anlagen läuft diese Reaktion bei Temperaturen von 850 °C und Drücken von etwa 25 bar ab. Als Reaktionsprodukt entsteht Kohlenmonoxid und Wasserstoff [winter,89].

Reaktionsgleichung: $C_nH_m + n\ H_2O \rightarrow n\ CO + (n + m/2)\ H_2$ (Gl. 3.1)

Das Verfahren ist technisch ausgereift und großtechnische Dampfreforming-Anlagen besitzen Kapazitäten von 100.000 Nm^3/ h. Die Investitionskosten von Anlagen (inkl. Entschwefelung, CO-Konvertierung, Reinigung und Restgasnutzung) mit einer Jahreskapazität von 800 Mill. Nm^3/ a liegen bei ca. 200 Mill. DM. Die Wasserstoffgestehungskosten errechnen sich zu rund 20 Pf/ Nm^3, wobei die Primärenergiebezugskosten und die Personalkosten in der Berechnung ausschlaggebend sind [zittel,98].

Partielle Oxidation schwerer Kohlenwasserstoffe:
Mit dem Texaco-Verfahren kann aus Schweröl und Rückstandsölen aus der Erdölverarbeitung mittels Vergasung Wasserstoff gewonnen werden. Die Eingangsstoffe werden bei Temperaturen von 1.300 bis 1.500 °C in einer Flammenreaktion unter Dampf- und Sauerstoffzusatz durch partielle Oxidation aufgeschlossen. Durch entsprechende Bemessung der Sauerstoff- und Wasserdampfmengen läuft die Vergasung autotherm, d.h. ohne äußere Energiezufuhr ab. Als Ausgangsprodukte entstehen Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasserstoff [winter,89].

Reaktionsgleichung: $CH_{1,4} + 0{,}3\ H_2O + 0{,}4\ O_2 \rightarrow 0{,}9\ CO + 0{,}1\ CO_2 + H_2$ (Gl. 3.2)

Partialoxidatoren sind großtechnisch einsetzbar und werden mit üblichen Kapazitäten von 100.000 Nm^3/h angeboten. Die Investitionskosten einer Anlage (inkl. Luftzerlegung, CO-Konvertierung, Sauergasabtrennung, Schwefelgewinnung, Methanisierung und Restgasnutzung) mit einer Jahreskapazität von 800 Mill. $Nm^3/$ a liegt in der Größenordnung von 800 Mill. DM. Die Wasserstoffgestehungskosten errechnen sich zu ca. 25 Pf/ Nm^3, abhängig von den Primärenergiebezugskosten und dem Personalaufwand [zittel,96].

Partielle Oxidation von Kohle:
Die Vergasung von Kohle entspricht bis auf die dem Prozess vorgeschaltete Kohlebehandlung der Schwerölvergasung. Durch eine Vermahlung der Kohle und einer Zumischung von Wasser entsteht eine pumpfähige Suspension mit einem Feststoffgehalt von 50- 70 %. Bei Temperaturen von 1.400 – 1.600 °C läuft die Vergasung autotherm unter Zusatz von Dampf und Sauerstoff ab. Die Vergasungsreaktion wird entweder in einer Flugstaubflamme (Koppers-Totzek-Verfahren), in einem abbrennenden Festbett (Lurgi-Druckvergasung) oder in einem abbrennenden Wirbelbett (Hochtemperatur-Wirbelvergaser) durchgeführt [winter,89].

Das Verfahren findet zur Zeit in Kohleförderländern wie China und Südafrika aus Kostengründen für die eingesetzte Kohle großtechnischen Einsatz. Die Investitionskosten einer Kohle-Partialoxidation mit einer Jahreskapazität von 80 Mill. $Nm^3/$ a liegen bei 450-500 Mill. DM. Auch bei diesem Verfahren dominieren die Kosten für den Primär-energieträger Kohle und den Personalaufwand in der Berechnung der Wasserstoff-gestehungskosten. Diese werden mit ca. 30 Pf/ Nm^3 angegeben [zittel,98].

Konvertierung:
Das Wasserstoffgewinnungsverfahren der Konvertierung findet vornehmlich Anwendung als Anschlussprozess zum Dampfreforming und zur Vergasung. Dem wasserstoffhaltigem Rohgas wird Wasserdampf im Überschuss beigemischt. An einem Katalysator konvertiert das Kohlenmonoxid im Gasgemisch zu Wasserstoff und Kohlendioxid. Zur Erhöhung des CO-Umsatzes bei einem Dampfüberschuss wird eine doppelstufige Konvertierung mit einer Hochtemperaturstufe von 300 bis 500 °C und einer anschließenden Tieftemperaturstufe mit 200 °C eingesetzt [winter,89].

Reaktionsgleichung: $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ (Gl. 3.3)

Nachbehandlung von Wasserstoff:
Die Nachbehandlung des wasserstoffreichen Gases gilt nicht als ein Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff. Vielmehr wird die Qualität des Wasserstoffgases durch die Nachbehandlung verbessert. Dem meist schon konvertierten Gas wird abschließend durch Adsorption oder Membranabtrennung das Kohlendioxid entzogen. Eine zusätzliche Reinigungsstufe entfernt weitere unerwünschte Bestandteile aus dem Wasserstoff. Das brennbare Ausschussgas kann zusammen mit einer Teilmenge des Eingangsprimärenergieträgers zur Befeuerung der Anlage eingesetzt werden. Die Kosten der Konvertierung und Nachbehandlung des Wasserstoffs sind bereits in die angegebenen Anlageninvestitionskosten implementiert.

Entwicklungen im Bereich der konventionelle chemische Verfahren:

a) Kvaerner-Verfahren
Die KVAERNER ENGENIEERING S.A. aus Norwegen entwickelt seit den achtziger Jahren ein Verfahren zur CO_2-freien Herstellung von Aktivkohle und Wasserstoff. Bei einer Temperatur von 1.600 °C trennt ein Plasmaprozess unter Einwirkung von Strom und Kühlwasser Kohlenwasserstoffe wie Erdgas oder Öl in Aktivkohle und Wasserstoff. Als Nebenprodukt fällt noch Heißdampf an. Bei dem Verfahren findet ein nahezu vollständiger Materialumsatz statt, so dass keine nennenswerten Emissionen auftreten. Das Kvaerner-Verfahren befindet sich noch in der Pilotphase. In der weiteren Entwicklung ist ein modularer Aufbau einer großtechnischen Anlage mit einer Jahreskapazität von 6 Mill. Nm^3/ a. Die Investitionskosten dieser Anlage werden auf 300 Mill. DM geschätzt [zittel,96].

b) Kleine Reformer und partielle Oxidatoren
Der Übertragung der technisch bereits ausgereiften Großanlagen auf kleinere Energieeinheiten gilt die weitere Entwicklungsarbeit. Einsatz finden diese Kleinanlagen in mobilen Anwendungen wie Fahrzeugen oder in kleinen stationären Einheiten wie Heizanlagen, BHKW etc. Dabei ist die Partialoxidation von Methanol oder Diesel auf Grund des notwendigen niedrigen Temperaturniveaus dem Erdgasreformierung im Augenblick überlegen. Weitere Entwicklungspotenziale beim Reforming-Prozess zeigen sich, wenn auch die anfallende Prozesswärme genutzt werden kann [zittel,96].

3.2.2 Elektrolyse

Unter der Elektrolyse versteht man die Zersetzung von Wasser (H_2O) in seine Bestandteile Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) durch Energiezufuhr in Form von elektrischer Energie. Die elektrische Energie kann dabei ihren Ursprung sowohl in einem Primärenergieträger haben als auch durch regenerative Energien gewonnen werden. Die Elektrolyse besteht aus zwei Teilreaktionen an den beiden Elektroden, welche sich in einem ionenleitenden Elektrolyten befinden. An der negativen Elektrode (Kathode) entsteht Wasserstoff und an der positiven Elektrode (Anode) Sauerstoff. Durch einen Austausch von Ionen findet der notwendige Ladungsaustausch statt. Die beiden Reaktionsräume werden mit einem ionendurchlässigen Diaphragma voneinander separiert, um eine Vermischung der Produktionsgase zu verhindern.

Reaktionsgleichungen: Kathode $2\,H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ (Gl. 3.4)
Anode $2\,OH^- \rightarrow \frac{1}{2}\,O_2 + H_2O + 2e^-$ (Gl. 3.5)

Abbildung 3.2 zeigt eine Übersicht über verschiedene Elektrolyseverfahren, die im weiteren näher gekennzeichnet werden.

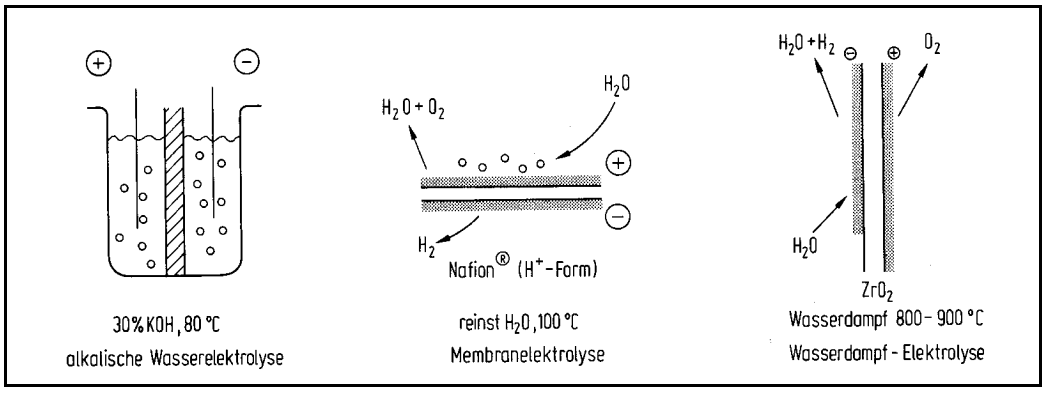

Abbildung 3.2: Übersicht der Elektrolyseverfahren [winter,89]

Alkalische Elektrolyse:
Die alkalische Elektrolyse wird bereits seit rund 80 Jahren kommerziell zur Wasserstoffherstellung genutzt. Sie arbeitet mit einem wässrigen, alkalischen Elektrolyten (30 %-ige Kalilauge KOH). Zur Abtrennung des Reaktionsraumes wird ein mikroporöses Asbest-Diaphragma eingesetzt. Durch Hintereinanderschaltung mehrerer Einzelzellen zu einem Stack wird die Leistung erhöht. Dabei sind die Elektrolyseure bipolar ausgeführt, d.h. die metallische Trennwand zwischen den Einzelzellen trägt auf der einen Seite die Anode der einen Zelle und auf der anderen Seite die Kathode der nächsten Zelle. Die Arbeitstemperatur liegt bei ca. 80 °C [winter,89]. Die Technik der alkalischen Elektrolyseure gilt als weitgehend ausgereift. Aus Kostengründen werden allerdings nur kleine bis mittlere Anlagen produziert (100-1000 Nm^3/h oder 0,5 bis 5 MW). Große Anlagen sind nur wirtschaftlich, wenn genügend kostengünstige elektrische Energie z. B. aus der Wasserkraftnutzung zur Verfügung steht [zittel,96]. Tabelle 3.4 zeigt die Standorte der derzeit weltweit größten Anlagen.

Ort	**Hersteller**	**Kapazität H_2 in Nm^3/h**
Nangal, Indien	DeNora	30.000
Aswan, Ägypten	Brown Boveri	33.000
Ryukan, Norwegen	Norsk Hydro	27.900
Ghomfjord, Norwegen	Norsk Hydro	27.100
Trail, Kanada	Trail	15.200
Cuzco, Peru	Lurgi	4.500
Huntsville, Alabama/USA	Electroyser Corp.	535

Tabelle 3.4: Große Wasserstoff-Elektrolyse-Anlagen [winter,89]

Die Kosten für kommerzielle Elektrolyseure liegen zwischen 500 – 1000 DM/ kW_{el}. Große Anlagen sind bezogen auf die spezifischen Kosten billiger als kleinere Einheiten. So liegen die Kosten im MW-Bereich bei ca. 500 DM/ kW_{el} und für eine Kleinanlage mit 1 kW bei 10.000 DM. Auch die Wirkungsgrade liegen bei Großanlagen mit 65-70 % höher als bei den Kleineinheiten mit 50-60 % [zittel,98].

Elektrolyseverfahren in der Entwicklung:

a) Membran-Elektrolyse
Die Membranelektrolyse bedient sich einer protonenleitenden Ionentauschermembran als Elektrolyt und Diaphragma. Auf die beiden Oberflächen der Membran wird abstandslos die Kathode und die Anode mittels eines Diffusions-Fällungsverfahrens aufgebracht. Das zu zersetzende Wasser bedarf bei diesem Verfahren keinerlei Elektrolytzusätze um dessen Leitfähigkeit zu erhöhen und wird ausschließlich anodenseitig zugeführt. Die Membran-Elektrolyseure sind ähnlich wie die alkalischen Elektrolyseure bipolar aufgebaut. Die Entwicklung der Membran-Elektrolyse entstand aus der Forschung an entsprechenden Brennstoffzellentypen (vgl. Kapitel 5) [zittel,96]. In der fortschreitenden Entwicklung dieses Verfahrens hat sich gezeigt, dass es zunächst eher in Kleinanlagen zum Tragen kommt. Ein großtechnischer Einsatz ist zur Zeit nicht angedacht. Die Investitionskosten für entsprechende Anlagen hängen stark von der weiteren Entwicklung und Fertigung entsprechender Brennstoffzellentypen ab. Bei einem Übergang zu einer Serienfertigung von Membran-Brennstoffzellen stellt sich dieses Verfahren trotz der kleineren Einheitsgrößen als wirtschaftlich dar.

b) Hochdruckwasserelektrolyse
Eine besondere Materialauswahl und –optimierung erlaubt es, Wasserstoff mit Drücken bis zu 50 bar zu generieren. Ein weiteres Entwicklungsziel ist eine optimale Leistung des Elektrolyseurs auch bei stark schwankender Energiezufuhr z.B. durch Photovoltaik- oder Windkraftanlagen. Das sich noch in der Entwicklung befindliche Verfahren wird voraussichtlich Investitionskosten von ca. 2000-2500 DM/ kW verursachen [zittel,98].

c) Hochtemperatur-Elektrolyse
Die Hochtemperaturelektrolyse (HotElly) verwendet als Elektrolyt eine Sauerstoffionen-leitende Keramik. Das Wasser wird kathodenseitig als Dampf zugeführt, der bei der Zersetzung ein Wasserstoff-Dampf-Gemisch bildet. Die durch die Keramik transportierten OH^--Ionen entladen sich an der Anode zu Sauerstoff. Die Hochtemperaturelektrolyse versucht einen Teil der notwendigen Energie extern in Form von Hochtemperaturwärme um 800-1.000 °C einzubringen und den Anteil der elektrischen Energie zu senken. Der Hintergedanke zu diesem Verfahren ist die Nutzung von Kraftwerksabwärme oder konzentrierter solarer Strahlungsenergie. Das Verfahren ist aber durch Werkstoffprobleme bislang nicht über den Entwicklungsstatus hinaus gekommen.

3.2.3 Biologische Verfahren

Wasserstofferzeugung aus Biomasse:
Der Vorteil der Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse gegenüber der Elektrolyse liegt darin, dass durch die direkte Produktion der Umweg über die Verstromung entfällt und sich somit der Systemwirkungsgrad erhöhen lässt. Die Biomasse verhält sich ähnlich wie konventionelle Primärenergieträger, ist allerdings in absehbaren Zeiträumen regenerierbar.

a) Wasserdampfvergasung von Biomasse
Wasserstoff aus Biomasse kann sowohl aus Gas als auch aus Feststoffen gewonnen werden. Durch Pyrolyse (Zersetzung) oder Vergasung entstehen wasserstoffreiche Gase. Der Wasserstoffanteil des Gases wird von den Prozessparametern Druck und Temperatur bestimmt. Die schon beschriebenen Verfahren der Vergasung bzw. des Reformings kommen in diesem Segment zur Anwendung. Auch ist der Einsatz einer weiteren Konvertierungsstufe möglich. Die Kommerzialisierung dieses Verfahrens wird in kurzer Zeit erwartet [zittel,96].

b) Vergärung von Biomasse
Durch anaerobe Methangärung kann aus Biomasse mit einem hohen Flüssigkeitsanteil oder flüssiger Gülle Biogas entstehen. Dieses enthält hohe Anteile CO und CH_4 (Methan). Durch Reformierung kann daraus Wasserstoff gewonnen werden. Direkt eingesetzt werden kann das Gas bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen (z.B. MCFC), wobei der Reformierungprozess auf Grund der hohen Temperaturen direkt an der Elektrode stattfindet. Die Biomassenvergärung ist schon zur Marktreife entwickelt. Die Kommerzialisierung der direkten Gasnutzung hängt von der Entwicklung einer geeigneten Brennstoffzelle ab und ist in Kürze zu erwarten [zittel,96].

Wasserspaltung mit Sonnenenergie:
Die Erzeugung von solarem Wasserstoff ist mit photoelektrochemischen, photochemischen und photobiologischen Verfahren möglich. Die solare Strahlungsenergie stellt bei diesen Verfahren die nötige Energie zur Spaltung des Wassers zu Verfügung. Allerdings bedarf es bei diesen Methoden eines zusätzlichen Systems der Strahlungsabsorption, da Wassermoleküle allein die Sonnenstrahlung nicht absorbieren können. Das vielversprechendste Verfahren ist die photobiologische Wasserstoffherstellung. Bestimmte

Bakterien- und Algenarten können unter Einwirkung von Sonnenenergie Wasserstoff freisetzen oder ihn als Zwischenprodukt erzeugen. Prinzipiell unterscheidet man zwei Verfahren: Die Photosythese zu deren Ablauf Licht benötigt wird und die Fermentation, die in Dunkelheit abläuft. Aus dem Forschungsstadium heraus vermutet man in ca. 5 Jahren ein marktreifes System entwickeln zu können. Bisherige Ergebnisse lassen Produktionskosten für solaren Wasserstoff um 25 Pf/ Nm^3 vermuten [zittel,96] [winter,89].

3.2.4 Wasserspaltung durch thermochemische Kreisprozesse

Wasser kann theoretisch ohne Aufwendung zusätzlicher Nutzarbeit bei Temperaturen größer 2.000 K thermisch gespalten werden. Neben den bei diesen Temperaturen auftretenden Materialproblemen und der nicht gelösten Frage der Wärmeabstrahlung ist auch bislang keine Energiequelle bekannt, die so hohe Temperaturen zu einem akzeptablen Preis bereitstellt. Im technischen Maßstab gilt eine Temperaturgrenze von 1.100 K bis 1.200 K für die thermochemischen Kreisprozesse. In diesem Bereich ist die Materialfrage gelöst und die Temperaturen können in Hochtemperaturreaktoren und in konzentrierenden Solarstrahlungsempfängern erreicht werden. Die technisch notwendige Temperaturabsenkung hat zur Folge, dass Wasser nur noch thermisch gespalten werden kann, wenn der Kreisprozess wenigstens 2 Reaktionsstufen enthält. Der maximale theoretische thermische Wirkungsgrad bei einer Obertemperatur von 1.000 K und einer Untertemperatur von 300 K errechnet sich zu 88 %. Modellhafte Berechnungen zeigen aber, dass der theoretische Wirkungsgrad mit steigender Anzahl der Stufen sinkt und sich damit auch die thermische Ausbeute reduziert. Bisherige Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der thermochemischen Wasserspaltung gehen von einem technischen Wirkungsgrad, unter Einschluss der Erzeugung der Elektrizität, von 30-40 % aus. Dadurch ergibt sich im Moment kein nennenswerter Vorteil gegenüber dem Verfahren der Wasserstoffelektrolyse. Außerdem ist die Entwicklung noch nicht über den Status der Grundlagenforschung hinausgetreten [winter,89] [zittel,96].

3.2.5 Übersicht der Verfahren:

Die folgende Tabelle 3.5 fasst die möglichen Methoden der Wasserstoffgewinnung mit ihren charakteristischen Kenngrößen zusammen.

Einordnung	Art des Verfahrens	Rohstoff	Entwicklungs-status	Anlagen-größe Nm^3	Investitionen Anlagengröße DM
Konventionell	Dampf-Reforming	Erdgas	Technisch Ausgereift	800 Mio.	200 Mio.
Konventionell	Partielle Oxidation	Schweröl	Technisch ausgereift	800 Mio.	800 Mio.
Konventionell	Partielle Oxidation	Kohle	Technisch ausgereift	80 Mio.	450-500 Mio.
Konventionell	Kvaerner Verfahren	Kohle	Entwicklung	6 Mio.	0,5-2,5 Mio.
Elektrolyse	Alkalisch	Elektr. Energie	Technisch ausgereift	0,8 – 8 Mio.	k.A.
Elektrolyse	Membran	Elektr. Energie	Entwicklung	Kleine Einheiten	k.A.
Elektrolyse	Hochdruck	Elektr. Energie	Entwicklung	k.A.	k.A.
Elektrolyse	Hoch-temperatur	Elektr. Energie	Entwicklung	k.A.	k.A.
Biologisch	Biomasse-Reforming	Methan	Entwicklung	k.A.	k.A.
Biologisch	Biomasse-	Methan	Entwicklung	k.A.	k.A.
Biologisch	Photochemische Prozesse	Sonnenenergie	Forschung	k.A.	k.A.
Thermisch	Thermochemische Kreisprozesse	Sonnenenergie	Forschung	k.A.	k.A.

Tabelle 3.5: Methoden zur Wasserstoffgewinnung

3.3 Weiterverarbeitung, Speicherung und Transport

3.3.1 Weiterverarbeitung von Wasserstoff

Vorgeschaltete Reinigung der Ausgangsstoffe:
Ein Großteil der unerwünschten Bestandteile kann bereits vor dem Reformierungprozess oder der Partialoxidation aus dem Rohgas herausgefiltert werden. Zum Einsatz kommende Verfahren sind die Entstaubung von Kohle- und Biogas, die Entschwefelung von Erdgas und die Entfernung von Kohlendioxid durch die CO_2-Wäsche.

Feinreinigung:
Entsprechend den Anforderungen der Endverbraucher wird der Wasserstoff in einer, dem Erzeugungsprozess folgenden, Reinigungsstufe nachbehandelt. Die Reinigungsstufe entfernt in erster Linie die Produkte der unvollständigen Reformierung wie CO, H_2O, O_2, NH_3 und CO_2. Je nach Anwendungszweck wird Wasserstoff in den verschiedensten Reinheiten im Gashandel angeboten. Tabelle 3.6 gibt Aufschluss über die angeboten Reinheitsstufen und die Grenzwerte der darin zulässigen Nebenbestandteile. Die Reinheiten 5.3, 5.6 und 6.0 werden mit einem Zertifikat ausgeliefert, welches die Einhaltung der Grenzwerte für die Nebenbestandteile bestätigt.

Wasserstoff						
Gasbezeichnung	3.0	3.8	5.0	5.3	5.6	6.0
Reinheiten in Vol.-%	≥ 99,9	≥ 99,98	≥ 99,999	≥ 99,9993	≥ 99,9996	≥ 99,9999
Nebenbestandteile in vpm						
O_2	≤ 50	≤ 10	≤ 2	≤ 1	≤ 0,7	≤ 0,3
N_2	≤ 500	≤ 300	≤ 3	≤ 3	≤ 1	≤ 0,5
H_2O	≤ 100	≤ 20	≤ 5	≤ 2	≤ 1	≤ 0,5
C_nH_m			≤ 0,5	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,1

Tabelle 3.6: Angebotene Reinheiten von Wasserstoff [linde1,00]

Verdichtung:
Eine Verdichtung von Wasserstoff kann analog zur Erdgaskomprimierung erfolgen. Die Kompressoren müssen nur durch geeignete Dichtungen aus Teflon dem Wasserstoffeinsatz angepasst werden. Die zur Verdichtung erforderliche Arbeit bei isothermer Verdichtung errechnet sich aus [kuch,96]:

$$W_{t,ith} = m\, R_{H2}\, T \ln (p_2/ p_1) \qquad \text{(Gl. 3.6)}$$

mit:
- $W_{t,ith}$ *isotherme Verdichtungsarbeit*
- m *Masse des Gases*
- R_{H2} *Spezielle Gaskonstante 4124 J/kgK*
- T *konstante Temperatur des Gases*
- p_1 *Anfangsdruck*
- p_2 *Enddruck*

Durch den logarithmischen Zusammenhang zwischen Verdichtungsarbeit und Druckverhältnis benötigt man für eine Verdichtung von 1 bar auf 10 bar etwa gleich viel Energie wie für eine Kompression von 10 bar auf 100 bar. Die Wahl des oberen Druckniveaus hängt in erster Linie von dem maximal zulässigen Höchstdruck des Speichermediums ab, da

sich der energetische Mehraufwand durch einen unwesentlich höheren Druck in Grenzen hält. Durch die fortgeschrittene technische Entwicklung im Bereich der Erdgaskomprimierung sind für die Wasserstoffverdichtung Anlagen in allen möglichen Größenordnung und Leistungen verfügbar. Je nach erforderlichem Ausgangsdruck werden mehrstufige Verdichter angewandt. Anlagen im MW-Bereich zur Vorbereitung des Gases auf dem Ferntransport per Pipeline wie beim Erdgas werden heute noch nicht eingesetzt, da für diese Anwendung die Verflüssigung des Wasserstoff größere Perspektiven liefert.

Verflüssigung:
Der Anlieferdruck des Wasserstoffs zur Verflüssigung muss mindestens 20 bar betragen. Die Verflüssigung erfolgt durch Verdichtung und anschließende irreversible Entspannung über Drosselventile oder teilweise reversible Entspannung mit Entspannungsmaschinen. Die erste, der in der Regel sechs, Wärmetaucherstufen wird mit Flüssigstickstoff mit einer Temperatur von 63 K vorgekühlt. Am Ende des Prozesses hat der Flüssigwasserstoff eine Temperatur von ca. 21 K. Bereits Mitte der fünfziger Jahre wurden Anlagen mit Produktionskapazitäten von 10- 60 t/ d oder 6.000-35.000 l/ h in den USA errichtet. Weltweit sind heute ca. 10 solcher mittelgroßen Anlagen in Betrieb. In späteren Jahren wurden hauptsächlich Anlagen mit kleineren Kapazitäten im Bereich von 3-12 t/ d oder 2.000-6.000 l/ h gebaut. In Deutschland betreibt die Firma Linde in Ingolstadt eine Anlage mit einer Kapazität von 4,4 t/ d [zittel,98].

3.3.2 Speicherung

Druckgasspeicherung:

a) Stationäre Großspeicher
Wasserstoff kann ähnlich wie Erdgas in großen Mengen in unterirdischen Speichern gelagert werden. Als Speicherräume werden Porenspeicher, Aquifere, Salz- und Felskavernen genutzt. In England und Frankreich besitzt man mit diesem Verfahren schon Langzeiterfahrungen. Der britische Chemiekonzern ICI betreibt in Teeside drei Salzkavernen mit einer Tiefe von bis zu 366 m und einem Druck von bis zu 50 bar. Von 1957 bis 1974 speicherte die GAZ DE FRANCE ca. 330 Mio. m^3 Stadtgas mit einem Wasserstoffanteil von 50 % in einem Aquiferespeicher [zittel,96]. In Deutschland unterhalten die Stadtwerke Kiel seit 1971 eine Gaskaverne zur Speicherung von Stadtgas mit einem Wasserstoffanteil von 60 bis 65 %. Der Speicher besitzt ein geometrisches Volumen von 32.000 m^3 und eine Tiefe von 1.330 m. Das Gas wird dort unter einem Druck von 80 – 160 bar eingelagert [winter,89]. Die unterirdische Speicherung ist wesentlich kostengünstiger als andere Speichermethoden, hängt aber von den örtlichen geologischen Voraussetzungen ab und ist nur für sehr große Speicherkapazitäten realisierbar.

b) Stationäre Kleinspeicher
In Verteilungsnetzen können analog zur Erdgaswirtschaft Scheiben- oder Glockengasspeicher oder Niederdruckkugelbehälter mit Volumina größer 15.000 m^3 eingesetzt werden. Erfahrungen mit der Speicherung von Wasserstoff in dieser Form in Bezug auf die Dichtheit der Behälter liegen nicht vor, da kein entsprechend großes Verteilungsnetz für Wasserstoff mit der Notwendigkeit von Zwischen- und Ausgleichsspeichern bislang realisiert wurde.

In der Industrie sind standardisierte Druckgasspeicher im Einsatz. Die zylindrischen Speicher mit einem Durchmesser von 2,8 m werden in Längen zu 7,3 m, 10,8 m und 19 m angeboten. Bei einem Speicherdruck von 45 bar können 1.300 bis 4.500 m^3 Wasserstoff gespeichert werden. Die Tankspeicherung erreicht spezifische Speichergewichte von 0,24 – 0,31 kWh/ kg und Speichervolumina von 0,135 kWh/ l inklusive des Speichergewichtes.

Kleinere Mengen Wasserstoff werden in handelsüblichen Stahlflaschen im Gashandel angeboten. Die Flaschen mit einem Rauminhalt von 2 – 50 Litern beinhalten 0,3 bis 8,9 m^3 Wasserstoff bei einem Druck von 200 bar. Das Gewicht liegt mit Füllung bei 5,3 bis 68 kg. Die Flaschen können zu Flaschenbündeln mit 12 Falschen je 50 Litern und zu Trailern (Bündelwagen) zusammen gefasst werden.

Stationäre Kleinspeicher werden von den Herstellern technischer Gase angeboten. Üblicherweise werden die Speicher vom Gaslieferanten gestellt und für die Nutzung eine Mietgebühr erhoben. Die Speicherbehälter können alternativ dazu auch vom Endverbraucher erworben werden. In diesem Fall ist aber der Eigentümer für die regelmäßige technische Überwachung der Speicher verantwortlich.

c) Mobile Kleinspeicher
Um die spezifischen Speichergewichte für den mobilen Einsatz, vornehmlich in Fahrzeugen, zu senken, werden die Speicherdrücke erhöht und leichtere Materialien eingesetzt. Angestrebt ist eine Erhöhung des Speicherdrucks von 200 auf 300 bar. Weiterhin wird der Stahltank in den letzten Jahren durch Composit-Tanks ersetzt. Dadurch konnte die spezifische Speicherdichte von ca. 0,5 kWh/kg für Stahlspeicher durch Druckerhöhung verdoppelt und in Kombination mit neuen Materialien auf ca. 2,1 kWh/kg vervierfacht werden.

Flüssiggasspeicherung:

a) Stationäre Flüssiggasspeicher
Speicher für flüssigen Wasserstoff werden als wärmeisolierte, doppelwandige Behälter (Dewarts) ausgeführt. Zwischen Innen- und Außenwand wird im evakuierten Raum die Wärmeisolierung eingebracht. Sie besteht bei Großbehältern meist aus Perlit, kleinere Speicher verwenden meist eine Superisolation aus 30 aufeinander liegenden aluminisierten Kunststofffolien. Die Superisolation stellt hohe Ansprüche an das Vakuum und ist wesentlich kostspieliger als Perlite. Flüssigwasserstoffspeicher großer Volumina werden hauptsächlich als Treibstofflager für die Raumfahrt eingesetzt. Der größte Flüssigwasserstoffspeicher befindet sich bei der NASA in Cape Canaveral. Der Kugelspeicher hat einen Durchmesser von 20 m und ein Speichervolumen von 3.800 m^3, was ca. 270 t flüssigem Wasserstoff entspricht. Durch eine Perlit-Vakuumisolierung und die Größe des Speichers lassen sich die Speicherverluste verringern. Abdampfraten von 0,03 % pro Tag sind durchaus erreichbar. Kleinere Speicher als Stand- oder Transportbehälter erreichen je nach Isolierungsart und Geometrie Abdampfraten von 0,4 bis 2 % pro Tag. Flüssigspeicher sind in allen Größenordnungen ab 100 Litern bei den Herstellern technischer Gase erhältlich. Übliche Standtanks in den Größenordungen von 1.500 l (1.100 m^3) bis 75.000 l (60.000 m^3) erreichen Durchmesser von 1,4 bis 3,8 m und Höhen von 3 bis 14 Metern.

b) Mobile Flüssiggasspeicher
Ähnlich der Druckgasspeicher für den Einsatz in Fahrzeugen findet auch eine Entwicklung mobiler Flüssiggasspeicher statt. Tanks aus 200 - 300 Lagen dünner Isolierfolien erreichen spezifischen Speichergewichte und -volumina von 4,5 kWh/ kg und 2,13 kWh/ l.

Metallhydridspeicher:
Metallhydridspeicher sind Speicherbehälter, Tanks oder Flaschen, die mit bestimmten Metalllegierungen gefüllt sind. Der Wasserstoff wird in das poröse Material eingebunden und kann ihm wieder entzogen werden. Vorteilhaft sind die geringen Beladungsdrücke, je nach Material bei 0 bis 10 bar und die Arbeitsweise im Bereich der Umgebungstemperatur. Je nach Material kann auch eine Reinigungsfunktion durch das Metallhydrid auf den eingelagerten Wasserstoff integriert werden. Die Anwendung dieser Speicher-Technologie erstreckt sich

dadurch auch auf Gasreinigungsanlagen. Durch das zusätzliche Einbringen von Material verschlechtern sich allerdings die spezifischen Speichergewichte auf 0,21 bis 0,39 kWh/ kg. Im Gegenzug kann aber das spezifische Speichervolumen deutlich erhöht werden. Es sind Werte von 1 - 1,5 kWh/ l realisierbar. Viele elementare Metalle, intermetallische Verbindungen und ein- oder mehrphasige Legierungen sind in der Lage Wasserstoff zu binden. Die Auswahl der jeweiligen Materialien in Metallhydridspeichern wird unter Berücksichtigung der folgenden Kriterien vollzogen [gfe,00]:

- Wasserstoffmenge, die pro Gewicht und Volumen reversibel gespeichert werden kann
- Temperatur und Druck bei der der Speicher betrieben werden muss
- Reaktionswärme und Bildungsenthalpie der Metallhydridbildung
- Kinetik der Absorption und Desorption
- Zyklische Lebensdauer
- Preis

Die Preise richten sich stark nach der Zusammenstellung der Materialen des Speichers, die sich aus dem speziellen Anwendungsfall ergibt. Pro Kubikmeter Wasserstoff-Speicherkapazität können Preise in folgenden Größenordnungen angegeben werden [gfe,00]:

1 m^3- Speicher	800 – 3.000 DM
10 m^3- Speicher	400 – 1.500 DM
100 m^3- Speicher	300 – 1.100 DM

Methanolspeicherung:
Die indirekte Speicherung von Wasserstoff in flüssigen Hydriden wie Methanol, erlaubt eine hohe massen- und volumenspezifische Speicherdichte (rund halb so groß wie bei Benzin) bei gleichzeitig problemloser Nutzung der Infrastruktur für flüssige Treibstoffe. Allerdings muss Methanol unter hohem Energieeinsatz aus Erdgas, Biomasse oder Wasserstoff und Kohlendioxid synthetisiert werden. Zum weiteren Einsatz z.B. in Brennstoffzellen muss der Wasserstoff aus dem Methanol zurückreformiert werden [wurster,97].

Weitere Speicherentwicklungen:

a) Eisenredoxspeicher
Die Eisenredoxspeicher sind ähnlich aufgebaut wie Metallhydridspeicher. Durch eine optimierte Materialauswahl und Verbesserung der Herstellungsmethoden werden erhebliche Vorteile in der Energiedichte und in den Speicherkosten erwartet.

b) Grafitnanofaserspeicher
An der Northeastern Universtiy of Boston in den USA ist ein Verfahren in der Entwicklung, welches alle bisherigen Wasserstoffspeicherverfahren übertreffen soll. Wasserstoff lagert sich dabei in mehreren Lagen auf Grafitfasern mit Querschnitten von 5 - 100 Nanometern und Längen von 5 – 100 Mikrometern an. Es wird vermutet, dass sich der Wasserstoff durch Absorption und Adsorption an die Fasern bindet. Der genaue Anlagerungsmechanismus ist aber noch nicht bekannt. Die Beladung des Speichers erfolgt unter Drücken von 136 bar in einem Zeitraum von 4 bis 24 Stunden. Die Speicherung erfolgt bei Raumtemperatur bei 30 bar. Durch Reduzierung des Speicherdrucks können bis zu 95 % der eingelagerten Wasserstoffmenge wieder freigesetzt werden. Bei dieser Speichertechnologie sollen Werte bis von 7,5 % bis 75 % des Carbongewichtes in Form von Wasserstoff eingelagert werden können [wurster,97]. Die Zahlen konnten allerdings im großen Maßstab noch nicht bewiesen werden. Man geht von theoretisch möglichen Werten von 14 % aus. Technisch realisierbar erscheinen Werte von 10 %. Damit wäre ein Wasserstofftank für Automobile mit einer

Reichweite von 500 km nur 10 % größer als ein herkömmlicher Benzintank [dwv,0100]. Die weitere mittlerweile internationale Entwicklung wird zeigen, ob die von den amerikanischen Forschern erwarteten hohen Werte auch technisch realisiert werden können. Sollte dies aber der Fall sein, gehen konservative Rechnungen davon aus, dass in 25 Litern Volumen und 15 kg Grafitmasse soviel Wasserstoff speicherbar ist, um einen Kleinwagen mit Brennstoffzellenantrieb mit einer Reichweite von 1.500 km zu konstruieren [wurster,97]. Schon bei realisierten 14 – 20 % Wasserstoffeinlagerung könnten sensationelle Speichergewichte von 112 bzw. 160 g H_2/ l oder 3,7 bzw. 5,3 kWh/ kg erreicht werden. Flüssiger Wasserstoff hat im Vergleich dazu eine Speicherdichte von 72 g H_2/ l [dwv,0499].

Zusammenfassung:
Abbildung 3.3 gibt einen Überblick über die verfügbare Wasserstoffspeichertechnik und über zukünftige Verfahren.

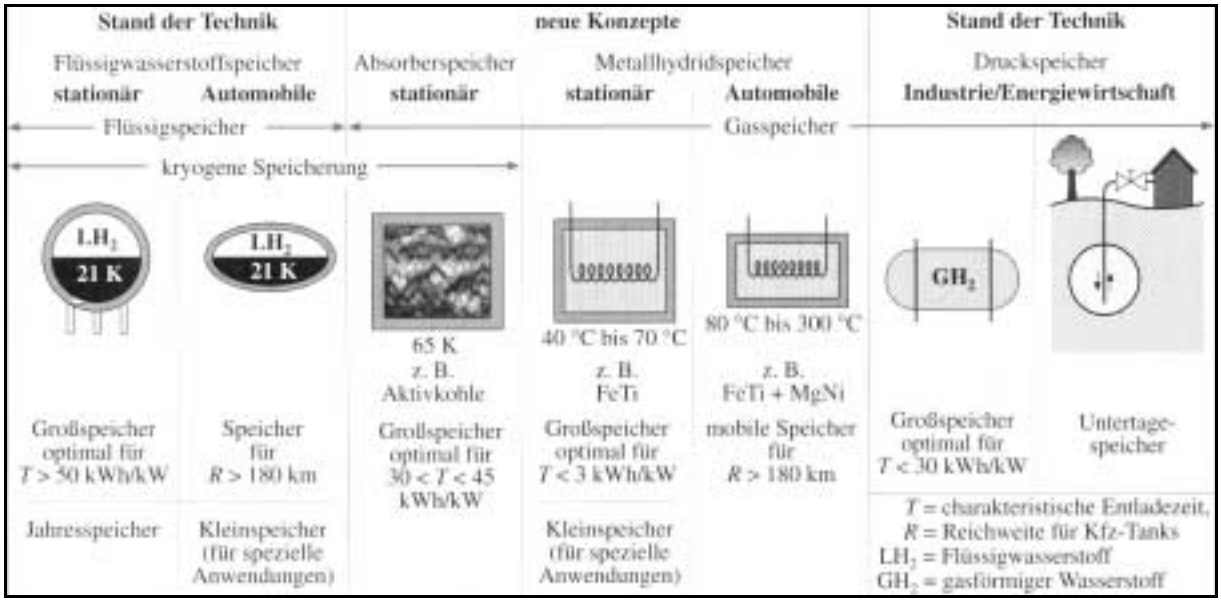

Abbildung 3.3: Verfügbare und zukünftige Wasserstoff-Speichertechniken [winter,97]

Tabelle 3.7 kennzeichnet die verschiedenen Wasserstoff-Speichermethoden in Bezug auf die spezifischen Speichergewichte (inklusive des Speichermaterials) vornehmlich für mobile Anwendungen.

Speichertechnik	Speicherform	Massenbezogene Energiedichte [kWh/kg]	Volumenbezogene Energiedichte [kWh/l]
Druck-Tankspeicher	gasförmig	0,24 – 0,31	0,135
Stahlspeicher 200 bar	gasförmig	0,5	k.A.
Stahlspeicher 300 bar	gasförmig	1,0	k.A.
Composit-Tank 300 bar	gasförmig	2,1	k.A.
Stahlspeicher	flüssig	4,5	2,13
Metallhydrid	gasförmig	0,21 – 0,39	1 – 1,5
Grafitnanofasern	gasförmig	k.A.	5,3

Tabelle 3.7: Spezifische Speichergewichte der verschiedenen Wasserstoff-Speichertechniken

3.3.3 Transport

Transport von Druckwasserstoff:
Druckwasserstoff (CGH_2) wird heute meist in mobilen Drucktanks mit 200 bar und Speichervolumina von 2.400 - 3.600 Nm^3 per LKW oder Eisenbahn transportiert. Werden regelmäßig größere Mengen Wasserstoff benötigt, ist ein Transport zwischen Hersteller und Verbraucher auch per Pipeline möglich. Dazu werden meist mehrere Produzenten und Verbraucher an das Pipelinenetz angeschlossen.

In Deutschland existieren 2 große Verteilnetze für Druckwasserstoff. Die Hüls AG betreibt eines im Ruhrgebiet und Linde unterhält ein Netz im Industriegebiet Leuna-Bitterfeld-Wolfen. Das Netz der Hüls AG ist das weltweit größte industrielle Netz für gasförmigen Wasserstoff. Es besteht bereits seit 1940 und umfasst auf einer Gesamtlänge von 220 km 18 Industrieanschlüsse, unter ihnen sowohl Verbraucher und als auch Erzeuger von Wasserstoff. Im langjährigen Einsatz dieses Netzes konnten ausreichende Erfahrungen im Pipelinetransport von gasförmigen Wasserstoff gesammelt werden. Abbildung 3.4 zeigt den Verlauf des größten Wasserstoffnetzes im Ruhrgebiet.

Abbildung 3.4: Wasserstoffnetz der Hüls AG im Ruhrgebiet [winter,89]

Transport von Flüssigwasserstoff:
Der Transport von Flüssigwasserstoff (LH_2) spielt in Deutschland keine bedeutende Rolle. Kleinere Mengen werden in vakuumisolierten Tanks per LKW gehandelt. In den USA existieren schon einige ca. 40 km lange Pipelines zum Transport von LH_2. Internationaler Handel z.B. mit kostengünstigen Wasserstoff aus Kanada findet in Form von maritimen Flüssigwasserstoff statt. Spezielle Schiffe, ähnlich wie für den Flüssiggastransport, befördern den flüssigen Wasserstoff über die Weltmeere. Bereits heute schon als marktfähig angesehen werden LH_2-Container, die per Schiff oder Bahn transportiert werden können. Flüssigwasserstoff wird in Deutschland nur bei Linde in Ingolstadt als Nebenprodukt der Mineralölindustrie erzeugt. Zusätzlich in flüssiger Form benötigter Wasserstoff wird aus Rotterdam oder Linz bezogen.

3.4 Anwendung von Wasserstoff

In der derzeitigen Gaswirtschaft kommt Wasserstoff eine große Bedeutung als wichtiger Rohstoff in der Chemieindustrie und zur Veredelung von Primärenergieträgern zu. Besonders diese nicht bzw. indirekt energetische Nutzung des Rohstoffs hat die Entwicklung der Wasserstofftechnik in den letzten Jahren vorangetrieben. Das in diesen Bereichen erworbene Wissen in der sicheren Erzeugung, Handhabung und Speicherung großer Mengen Wasserstoff ist für eine Expansion in die energetische Nutzung des Energieträgers von großer Bedeutung.

3.4.1 Nicht energetische Nutzung

Synthesen mit Wasserstoff:
Der weitaus größte Anteil des erzeugten Wasserstoffs wird bei der Ammoniak- und Methanolsynthese eingesetzt. Durch Synthese von Wasserstoff und Stickstoff nach dem Haber-Bosch-Verfahren wird Ammoniak erzeugt, der zu 80 % in der Düngemittelindustrie Einsatz findet und zu 20 % in die Kunststoffproduktion einfließt. Bei der Methanolsynthese wird aus einem Synthesegas, einer Mischung aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid, Methanol gewonnen. Über die Hälfte der erzeugten Methanolmenge wird zur Produktion von Kunststoffen benutzt. Nur ein kleiner Teil des Methanols wird heute in speziellen Anwendungen z.B. als Kraftstoffzusatz energetisch eingesetzt. In der Zukunft könnte Methanol nicht nur als chemisches Zwischenprodukt sondern auch als Energieträger und synthetischer Kraftstoff große Bedeutung erlangen. Der Umweg über Methanol zur Anwendung von reinen Wasserstoff könnte vor allem im mobilen Einsatz konventionelle Kraftstoffe auf Grund seiner vergleichbaren Eigenschaften substituieren. Eine problemlose Nutzung der derzeitigen Infrastruktur für Treibstoffe zur Verteilung von Methanol ist möglich und eine kostenaufwendige Anpassung der Infrastruktur an den Wasserstoffeinsatz entfällt [winter,89].

Eisenherstellung:
Neben den konventionellen Hochofenverfahren zur Herstellung von Roheisen aus Eisenerz existiert ein Direktreduktionsverfahren zur Eisenherstellung. Die Direktreduktion von Eisenerz zu Eisenschwamm wird unter Zugabe von Wasserstoff als Reduktionsgas durchgeführt. Durch verfahrenstechnische Vorteile und einer besseren Energiebilanz gewinnt dieses Verfahren in der Verhüttung von Eisenerzen zunehmend an Bedeutung [zittel,96].

Spezielle Wasserstoffverbraucher:
Es gibt weitere spezielle Anwendungen von Wasserstoff als Reaktionsmittel in den unterschiedlichsten Industriesparten. Bei der Herstellung von Chemikalien und Zwischenprodukten der organischen Chemie mit Hydrierreaktionen wird Wasserstoff benötigt. Ferner in der Lebensmittelindustrie zur Fettenthärtung, in der Metallurgie zur Herstellung von Wolfram, Molybdän und Nickel und in der Glasindustrie zur Fertigung hochwertiger Gläser. In der Elektrotechnik dient Wasserstoff bei der Siliziumherstellung und in der Halbleitertechnik als Schutzgas [winter,89].

3.4.2 Indirekt energetische Nutzung

Fossile Energieträger wie Erdöl, Schweröl und Kohle werden zu marktfähigen Produkten wie Benzin oder Gas veredelt. Die Einbringung von Wasserstoff als zusätzlichen Energieträger erhöht das Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnis (H/C- Verhältnis) und damit den Energieinhalt des Produktes. Weiterhin wird Wasserstoff zur Reinigung der fossilen Rohstoffe von Schwefel, Stickstoff und Schwermetallen als Reduktionsmittel eingesetzt [winter,89].

Hydrierende Raffinerieverfahren:
Durch Raffination von Schweröl und Erdöl werden leichte Heizöle und Kraftstoffe gewonnen. Beim Hydrotreating werden unter der Zugabe von Wasserstoff Verunreinigungen wie Schwefel, Stickstoff und metallische Verbindungen aus dem Rohöl herausgefiltert. Die Verunreinigungen würden in der späteren Verbrennung der Raffinerieprodukte zu erheblichen Schadstoffbelastungen führen. Das Hydrocracken ist ein Verfahren um, bei Einbringung von Wasserstoff aus schweren Rohölen und Ölsanden, leichte Raffinerieprodukte zu gewinnen. Die zunehmende Erschöpfung der Reserven an leichten Rohölen wird dieses Verfahren in Zukunft an Bedeutung gewinnen lassen [winter,89].

Hydrierende Kohleveredlung:
Eine Umwandlung von Kohle in synthetische Kohlenwasserstoffe ist technisch möglich. Diese hochwertigen Kohlenwasserstoffe dienen der chemischen Industrie als Grundstoff und als Energieträger. Sämtliche aus Erdöl und -gas erzeugten Produkte sind auch unter der Verwendung von synthetischen Kohlenwasserstoffen produzierbar. Die Veredelung von Kohle ist aber nur mit dem Hintergrund einer zunehmenden Erschöpfung der Erdöl- und Erdgasreserven zu sehen. Grundprinzip aller Veredelungsverfahren ist die Spaltung der hochmolekularen Struktur der Kohle unter Anlagerung von Wasserstoff in einer exothermen Reaktion. Je nach Art der eingesetzten Kohle und dem gewünschten Reaktionsprodukt unterscheidet man die hydrierende Kohlevergasung, Wasserdampfvergasung, die Hydropyrolyse und die Kohleverflüssigung [winter,89].

3.4.3 Energetische Nutzung

Verbrennung von Wasserstoff:
Bei der Verbrennung von Wasserstoff mit Luft in Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen entstehen durch geeignete Verbrennungsführung sehr geringe, vernachlässigbare Schadstoffemissionen. Spuren von Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid und Schwefelbestandteile können nur durch Verbrennung von geringen Mengen Motoren- und Schmieröl im Verbrennungsraum entstehen. Durch intelligente Prozessführung und Verringerung der Verbrennungstemperaturen kann auch die Entstehung von Stickoxiden deutlich vermindert werden.

a) Wasserstoffbrenner
Wasserstoff fällt bei vielen chemischen Prozessen als Koppelprodukt an. Ist die Weiterverarbeitung oder der Transport nicht rentabel, kann der Wasserstoff in der direkten Wärmeerzeugung andere Brenngase substituieren. Eine Zumischung zum Erdgas ist von Vorteil, da vorhandene Anlagen ohne größere Anpassungen genutzt werden können. Die Verbrennung von reinem Wasserstoff bedarf größerer Investitionen und durch die niedrigen Bezugspreise für Erdgas ist die Wirtschaftlichkeit eines Wasserstoffbetriebes im Moment in Frage gestellt [zittel,98].

b) Gasturbine
Gasturbinen können grundsätzlich auf Wasserstoffbetrieb umgerüstet werden. Vergleichbar mit den Wasserstoffbrennern ist auch bei Gasturbinen ein Kombibetrieb mit Erdgas kostengünstiger, da keine aufwendigen Anlagenanpassungen vorgenommen werden müssen. Wasserstoffanteile bis 80 % werden als unproblematisch angesehen. Beim Einsatz von Wasserstoff in Gasturbinen ist die Schadstofffreiheit des Energieträgers von Bedeutung. Verbrennungsrückstände und Aschepartikel, die Ablagerungen und Korrosion an den Turbinenschaufeln verursachen können, entstehen im Gegensatz zu anderen fossilen Energieträgern bei der Verwendung von Wasserstoff nicht. Dies wirkt sich positiv auf die Wartung und die Lebensdauer der Anlagen aus. Die chemische und petrochemische Industrie

nutzt bereits heute den als Koppelprodukt anfallenden Wasserstoff zur Stromerzeugung mit Gasturbinen [zittel,98].

c) Gasmotor
Konventionelle Motoren können problemlos mit einem Wasserstoff-Erdgas-Gemisch betrieben werden. Die Wirtschaftlichkeit eines reinen Wasserstoffbetriebes ist noch nicht absehbar, da die Technik noch einige Entwicklungsarbeit und hohe Investitionen bedarf. Dem Vergleich zu anderen Kraftstoffen kann der Einsatz von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen aber durchaus standhalten. Besonders in der Schadstoffemission kann der Gasmotor überzeugen. Das Entwicklungspotenzial eines reinen Wasserstoffmotors ist allerdings durch andere Technologien wie der Brennstoffzelle begrenzt und wird in der Zukunft wohl auch keine besondere Rolle spielen [zittel,98].

Wasserstoffspezifische Techniken:

a) Katalytische Brenner
Bei dem seit langem bekannten Prinzip des Döbereiner Feuerzeugs findet eine kalte Verbrennung statt, d.h. es entsteht keine Flamme. Wasserstoff und Sauerstoff werden an einem Katalysator zusammengeführt. Der Katalysator beginnt zu glühen und erzeugt Wärme. Der Temperaturbereich erstreckt sich von knapp oberhalb der Umgebungstemperatur bis zu einigen hundert Grad. Der entscheidende Vorteil ist die völlig emissionsfreie Verbrennung. Anwendung könnte das Verfahren in der Raumheizung finden. Der entstehende Wasserdampf als „Abgas“ könnte zur Regulierung der Raumluftfeuchte verwendet werden. Katalytische Brenner für Flüssiggas sind schon in verschiedenen Ländern in Betrieb. Der Einsatz von Wasserstoff bedarf aber noch eigener Entwicklungsarbeit im Bereich der Katalysatoren, der Sicherheitstechnik und der Konzeption gesamten Heizsysteme [winter,89].

b) H_2/ O2-Dampferzeuger
Von dem Raketenprinzip wurde der H_2/ O_2-Dampferzeuger abgeleitet. Ein stochiometrisches Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch wird kontrolliert zu Wasserdampf verbrannt. Zur Regelung der Dampfparameter wird zusätzlich Wasser in den Prozess eingespritzt, welches sofort verdampft. Die Vorteile liegen in der Reinheit des Dampfes, positiver Regeleigenschaften und extrem kurzen Ansprechzeiten. Schon kleine geometrische Abmessungen erlauben große thermische Leistungen. Ein Rohr mit einer Länge von 2 Metern und einem Durchmesser von 10 cm erlaubt thermische Leistungen von 35 MW. Durch Zumischung von Wasser lassen sich regelbare Temperaturen bis zu 3.300 °C erreichen. Die Elektrizitätswirtschaft bekundet Interesse an diesem Verfahren um in Dampfturbinenkraftwerken Spitzenlasten ausgleichen zu können. Kleinere Dampferzeuger finden Anwendung in Anlagen in denen einen schnelle Bereitstellung von Dampf und begrenzte räumliche Abmessungen gefordert werden, z.B. in der Dampfsterilisation, in der Pharmazie oder in der Lebensmittelindustrie [zittel,98].

c) Brennstoffzellen
Die wohl zukunftsweisendste Anwendung von Wasserstoff ist die Brennstoffzelle. In der Brennstoffzelle wird unter Freisetzung elektrischer Energie Sauerstoff und Wasserstoff zusammengeführt. Als Reaktionsprodukt entsteht Wasser (H_2O). Verschiedene Typen von Brennstoffzellen sind in der Entwicklung oder haben schon Marktreife erreicht. Umfassende Erläuterungen zum Thema Brennstoffzellen werden im Kapitel 4 gegeben.

Mobile Anwendungen:
In der Raumfahrt wird flüssiger Wasserstoff als Antriebsmittel genutzt. Die massenbezogene Energiedichte erweist sich dort als Entscheidungskriterium. In der Entwicklungsbemühungen versucht man die zuvor beschriebenen energetischen Anwendungen auf den Kraftfahrzeugbereich zu übertragen. Die vielversprechendste Entwicklung ist auch in diesem Bereich die Brennstoffzelle. Verschiedene Konzepte unter Verwendung von Erdgas, Methanol und Wasserstoff als Energieträger stehen kurz vor der Marktreife. Nahezu jeder Automobilkonzern betreibt Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet oder bildet Allianzen mit entsprechenden Forschungsstandorten. Die Weichen für den Einzug von Wasserstoff in den mobilen Anwendungsbereich sind gestellt. Der Umweg über Methanol oder Erdgas wird im Augenblick aufgrund der Nutzbarkeit der vorhandenen Infrastruktur für Kraftstoffe favorisiert. In der Entwicklung befinden sich wasserstoffbetriebene Fahrzeuge aller Kategorien.

3.5 Kosten für Wasserstoff

Der Preis für den Endverbraucher von Wasserstoff setzt sich aus den Herstellungskosten, den Umwandlungskosten und den Transport- und Verteilungskosten zusammen. Die Gewinnspannen der Produzenten und Handelspartner sowie staatliche Steuern und Abgaben sind in den folgenden Angaben nicht berücksichtigt. Dies sind variable Zuschläge, die politischen und wirtschaftlichen Einflüssen unterliegen. Um eine kostenmäßige Beurteilung von Wasserstoff zu ermöglichen soll auch an dieser Stelle ein Vergleich mit dem Energieträger Erdgas vollzogen werden. Für den Energieträger Erdgas gelten im Jahresdurchschnitt 1999 folgende Preise [schiffer,00]:

Erdgaspreise:

Einfuhrkosten	1,379 Pf/kWh
Endverbraucher Haushalt	5,295 Pf/kWh
Endverbraucher Industrie	2,694 Pf/kWh
Kraftwerke der Stromversorger	2,230 Pf/kWh
übrige Abnehmer	4,205 Pf/kWh
Gesamtdurchschnitt	*3,695 Pf/kWh*

3.5.1 Herstellungskosten

Heutige Herstellungskosten:
Die Kosten für die Erzeugung von Wasserstoff hängen sehr stark von den Bezugskosten der für die Erzeugung notwendigen Primär- oder Sekundärenergieträger, aber auch von der Produktionskapazität der Anlage ab. In Deutschland kann auf der Preisbasis für Primärenergieträger von 1987 und einer Produktionskapazität von 110.000 Nm^3/h mit den folgenden Wasserstoffkosten gerechnet werden [zittel,98]. Neuere Berechnungen der Herstellungskosten für Wasserstoff sind im Augenblick nicht verfügbar. Die Preisentwicklung für Primärenergieträger in den letzten Jahren in Deutschland ist nur geringen Schwankungen unterworfen und verläuft zyklisch in einer relativ konstanten und begrenzten Bandbreite [schiffer,99]. Trotz der überholten Preisbasis von 1987 ermöglichen die Zahlen eine Einordnung und einen Vergleich der Prozesskosten für die Erzeugung von Wasserstoff.

Die aktuellen Entwicklungen im Energiemarkt mit erhöhter staatlicher Besteuerung der Energie und einem generellen Preisanstieg für Primärenergieträger sind in den folgenden Zahlen nicht berücksichtigt. Um dieser Entwicklung im Segment der fossilen Energieträger Rechnung zu tragen, müssen die Kosten tendenziell nach oben korrigiert werden. Im Bereich der erneuerbaren Energien erscheint durch einen stetigen Rückgang der Anlagenkosten in den letzten Jahren eine Anpassung der Zahlen nach unten notwendig.

Wasserstoff aus fossilen Energieträgern:

aus Erdgas (Dampfreforming)	4,6 Pf/kWh
aus Schweröl (Partielle Oxidation)	5,9 Pf/kWh
aus Kohle (Kohlevergasung nach Winkler)	7,8 Pf/kWh
aus Kohle (Kohlevergasung nach Koppers/ Totzek)	12,2 Pf/kWh

Wasserstoff aus erneuerbaren Energieträgern:

Elektrolyse mit Strom aus Großwasserkraftwerken	5-10 Pf/kWh
Elektrolyse mit Strom aus Windkraftwerken	15-30 Pf/kWh
Elektrolyse mit Strom aus solarthermischen Kraftwerken	30-40 Pf/kWh
Elektrolyse mit Strom aus Photovoltaik	400 Pf/ kWh
Wasserstoff aus Biomasse	10 Pf/ kWh

Zukünftige Herstellungskosten:

Durch die starke Abhängigkeit der konventionellen Wasserstofferzeugung vom Bezugspreis für Primärenergieträger rechnet man kurzfristig mit sinkenden Gestehungskosten durch marktbedingt fallende Energiepreise. Langfristig wird eine Verteuerung der Energieträger auch die Wasserstoffgestehungskosten erhöhen, da die Kosten für die Energieträger die Kapitalkosten der Anlagen bei weitem übersteigen. Kostenreduktionen bei den Verfahren sind anzustreben, haben aber nur einen zweitrangigen Einfluss auf den Wasserstoffpreis.

Regenerative Konzepte zur Energieerzeugung (vornehmlich Techniken zur Stromerzeugung) werden in dieser Kostensituation wirtschaftlicher, da bei diesen Techniken der Kapitalaufwand im Vordergrund steht. Die Kosten für die Energieträger sind sehr gering oder erst gar nicht vorhanden. Eine technische Weiterentwicklung der Verfahren und eine massive Kostenreduktion durch Massenfertigung in den nächsten Jahren könnten die Stromgestehungskosten der Systeme senken und regenerative Konzepte konkurrenzfähig machen. Für 2020 prognostizieren Studien folgende mögliche Wasserstoffgestehungskosten aus regenerativen Systemen [zittel,98]:

Mögliche Wasserstoffgestehungskosten im Jahr 2020:

Wasserstoff aus Windkraftwerken	8-12 Pf/kWh
Wasserstoff aus solarthermischen Kraftwerken	15-20 Pf/ kWh
Wasserstoff aus Photovoltaik	22 Pf/ kWh
Wasserstoff aus Biomasse	8 Pf/kWh

3.5.2 Umwandlungskosten

Verflüssigung:

Die Kosten für die Verflüssigung von Wasserstoff hängen von der Größe und der Auslastung der Anlage ab. In Kanada wurde ein großer Verflüssiger mit 9,3 Pf/ kWh berechnet. Der Berechnung lagen aber sehr günstige Strombezugskosten zu Grunde. Die Kapazität heutiger Verflüssiger ist um eine Größenordnung kleiner. In Deutschland ergeben sich Kosten von ungefähr 13-15 Pf/ kWh für die Verflüssigung. Weitere Prozess-Optimierungen lassen aber noch Kostenreduzierungen um 30 % zu [zittel,98].

Komprimierung:
Die Kosten für die Komprimierung von Wasserstoff liegen in der Größenordnung der Erdgaskomprimierung bei gleicher Druckbasis und gleichen Volumen. Durch den um 2/3 geringeren Energieinhalt pro Volumeneinheit von Wasserstoff (vgl. Tabelle 3.1), verdreifachen sich die Kosten gegenüber Erdgas bezogen auf den Energieinhalt des Energieträgers. Je nach Durchsatz der Komprimierungsanlage können Kosten von 10 bis 30 Pf/ Nm^3 veranschlagt werden [zittel,98].

3.5.3 Transport- und Verteilungskosten

Nach heutiger Erkenntnis ist über größere Entfernungen nur ein Transport von Flüssigwasserstoff wirtschaftlich sinnvoll. Tabelle 3.8 zeigt die Aufschlüsselung der Kosten verschiedener Transportmittel für Flüssigwasserstoff aus unterschiedlichen Regionen der Erde. Die Kosten gelten von der Erzeugungsstätte bis zum Verbraucher in Hamburg [zittel,96].

	Erzeugung Pf/ kWh	**Transport Pf/ kWh**	**Gesamtkosten Pf/ kWh**
LH_2-Tanker aus Kanada	9	11,5	30
LH_2-Container aus Norwegen	8,3	16,1	31
LH_2-Container aus Kanada	k.A.	8	18-20
CGH_2-Behälter (200 bar) aus Island	k.A.	4	13

Tabelle 3.8: Transportkosten von Wasserstoff [zittel,96]

Endverteilung:
Die Verteilung an den Endverbraucher außerhalb Hamburgs erfolgt mittels Tankwagen. Die Kosten sind entfernungsabhängig. Für eine Strecke Hamburg-Dresden sind Endverteilungskosten von ca. 6 Pf/ kWh zu veranschlagen [zittel,98].

3.5.4 Nutzenergiekosten

Die Kosten, die für die Bereitstellung der Nutzenergie entstehen, setzten sich aus den einzelnen Kosten der Erzeugung, der Umwandlung und der Verteilung zusammen. Je nach Kombination der einzelnen Teilprozesse ergeben sich verschiedene Nutzenergiekosten. In Tabelle 3.9 ist die Kostenrechnung für den maritimen Wasserstofftransport aus Kanada für die Stadt Hamburg beispielhaft durchgeführt worden.

Systembestandteile	**Kosten in Pf/ kWh**
Strombezugskosten	4,12
Elektrolyse	5,02
Verflüssigung	9,28
Hafenanlagen Quebec	2,92
Schiffstransport	4,36
Hafen- und Speicheranlagen Hamburg	3,80
Verteilung Hamburg	0,40
Gesamtkosten	***29,9***

Tabelle 3.9: Kostenaufschlüsselung für den Wasserstofftransport [zittel,96]

Um die Gesamtkosten beurteilen zu können ist die Effizienz des Energieträgers von Bedeutung. Es ist zu erwarten, dass ein Fahrzeug mit einem Brennstoffzellenantrieb im Teillastbetrieb (Stadtverkehr) um den Faktor 2 effizienter ist als ein vergleichbares Dieselfahrzeug. Unter Berücksichtigung dieses Aspektes können die Treibstoffkosten durchaus um den Faktor 2 größer sein oder umgekehrt die Investitionskosten können sich bei gleichen Treibstoffpreisen verdoppeln ohne die Gesamtsystemkosten zu verändern.

3.6 Zahlen zur Wasserstoffwirtschaft

3.6.1 Erzeugung

Weltweit werden jährlich rund 500 Mrd. Nm^3 Wasserstoff umgesetzt. Bei chemischen Prozessen fallen 190 Mrd. Nm^3 oder 38 % der Wasserstoffmenge als Nebenprodukt an. Bei der Chor-Alkali-Elektrolyse (PVC-Herstellung) werden rund 10 Mrd. Nm^3 Wasserstoff freigesetzt [zittel,98]. Die Erzeugung von Wasserstoff basiert zu 97 % auf fossilen Energieträgern. Nur 2,5 % der gesamten Menge werden elektrolytisch gewonnen. Die Wasserelektrolyse besitzt nur einen halben Prozentpunkt am Gesamtvolumen und fällt in die Kategorie „Sonstige“ [winter,97]. Abbildung 3.5 zeigt den dominierenden Einfluss der fossilen Energieträger bei der weltweiten Erzeugung von Wasserstoff.

In der Bundesrepublik Deutschland wird jährlich eine Wasserstoffmenge von 19 Mrd. Nm^3 produziert. Die Anteile der Chlor-Alkali-Elektrolyse liegen bei 4,5 %.

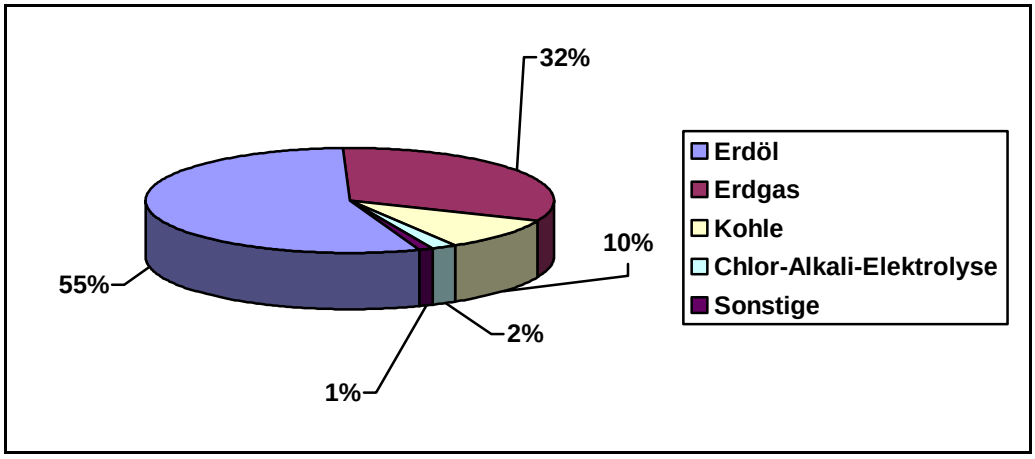

Abbildung 3.5: Globale Erzeugung von Wasserstoff nach Energieträgern [winter,97]

3.6.2 Verwendung

Welt:

Von den weltweit anfallenden 500 Mrd. Nm^3 Wasserstoff werden allein 46 % nicht energetisch für die Ammoniak- und Methanolsynthese benötigt. Die Synthesestoffe fließen größtenteils in die Düngemittel- oder Kunststoffproduktion ein. 20 % werden indirekt energetisch in der Petrochemie zur Veredelung von Energieträgern eingesetzt. Einer energetischen Verwendung werden weltweit nur ca. 28 % des Volumens zugeführt. In diesem Segment wird der Wasserstoff zum größten Teil durch Verbrennung in Wärme umgewandelt. Abbildung 3.6 zeigt die mondialen Anwendungsbereiche von Wasserstoff.

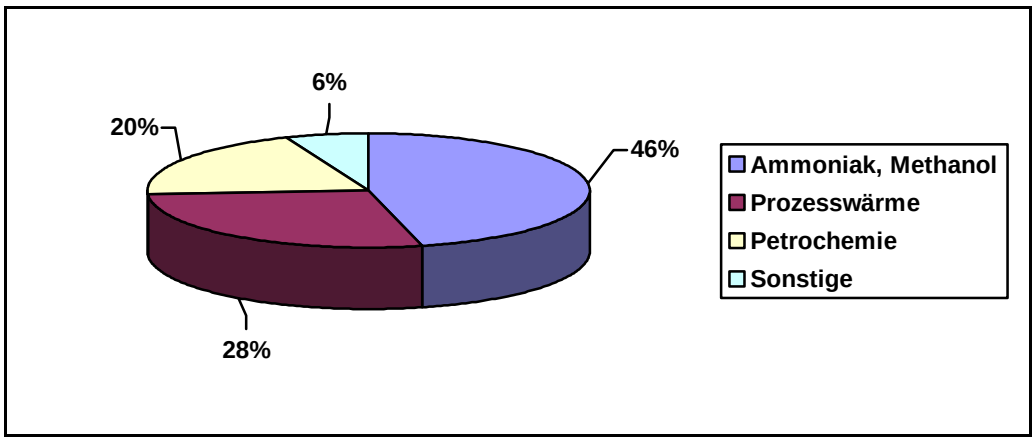

Abbildung 3.6: Weltweite Verwendung von Wasserstoff verschiedener Sektoren [winter,97]

Deutschland:

Das jährliche Wasserstoffaufkommen in Deutschland liegt bei rund 20 Mrd. Nm^3 [zittel,98]. Das entspricht rund 5 % des Erdgasaufkommens der Bundesrepublik von 350 Mrd. Nm^3 Erdgas im Jahr 1999 [schiffer,00]. Die Hälfte der Wasserstoffmenge in Deutschland wird energetisch genutzt und in Wärme umgewandelt. Die Wärme- und Stromproduktion im Industrie- und Raffineriebereich, die Beimischung zum Stadtgas und der Einsatz als Synthesegas sind die energetischen Anwendungsfelder. 25 % des Aufkommens werden nicht energetisch genutzt. Davon entfallen 20 % auf die Ammoniakherstellung und die restlichen 5 % auf den Einsatz in der Eisenerzreduktion, der Fettchemie, der Halbleiterindustrie, der Glasindustrie und der Chlor- und Wasserstoffperoxid-Produktion. Die Petrochemische Industrie hat einen Wasserstoffbedarf von 25 % am Gesamtvolumen. Die Methanolherstellung und die Veredelung von Energieträgern dominieren diesen indirekt energetischen Bereich [zittel,98].

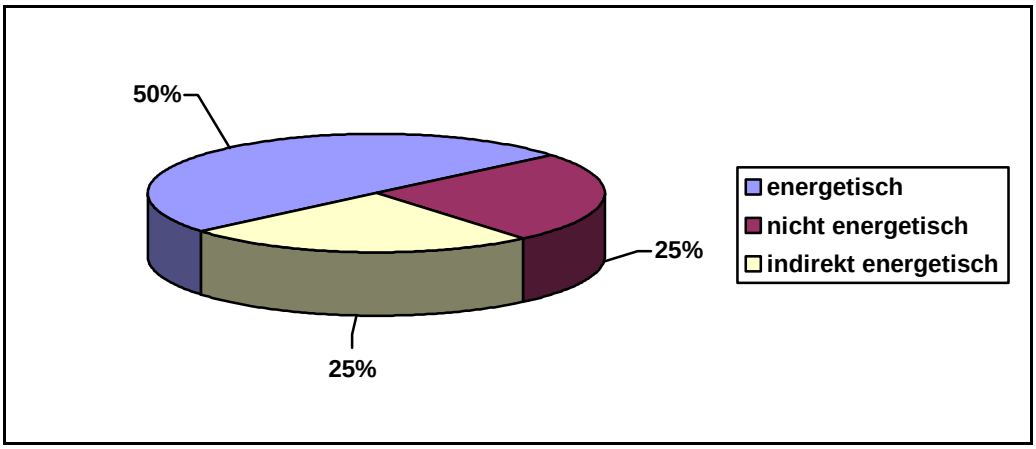

Abbildung 3.7: Anwendungsbereiche von Wasserstoff in Deutschland [zittel,98]

3.7 Bedeutung von Wasserstoff in der Energiewirtschaft

Die Verwendung von Wasserstoff hat schon eine lange Tradition. Vor allem in Anwendungsbereichen in denen der Energieinhalt pro Gewichtseinheit vor dem pro Volumeneinheit steht findet Wasserstoff zahlreiche Anwendungen. Anfänglich als Auftriebsmedium von Ballonen und Zeppelinen genutzt, ist er heute als Treibstoff in der Raumfahrt unerlässlich geworden. Energiewirtschaftliche Bedeutung erlangte der Wasserstoff in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts. Die gesamte Gasversorgung stützte sich auf Stadtgas, einem Kohlegas, das zu mehr als der Hälfte aus Wasserstoff besteht. Erst mit zunehmender Erschließung der Erdgas- und Erdölvorkommen sank die Bedeutung der Kohle und somit auch die des Stadtgases in der Energieversorgung [zittel,96].

Heute spielt Wasserstoff als Energieträger in der Energiewirtschaft, außer in speziellen Einzelanwendungen , keine entscheidende Rolle mehr. Die energetische Nutzung konzentriert sich heute vornehmlich auf die Verwertung des bei chemischen Prozessen als Nebenprodukt anfallenden Wasserstoffs. Unter Zumischung anderer Brenngase wird in dezentralen Anlagen thermische und elektrische Prozessenergie daraus erzeugt.

In der Energiewirtschaft ist ein anhaltender Trend zur kleineren, dezentralen Energieerzeugungsanlagen zu beobachten. Besonders in den Entwicklungs- und Schwellenländern ohne feste Verteilungsnetze ist eine dezentrale Struktur von Vorteil. Aber auch in der Energieversorgung der Industriestaaten gewinnen dezentrale Anlagen mit Karft-Wärme-Kopplung (KWK) zunehmend an Bedeutung. Bei zusätzlich wachsenden Anteilen fluktuierender, regenerativer Energien an der Energieversorgung kann Wasserstoff als Ausgleichsmedium eine zentrale Stellung in der Energiewirtschaft erlangen. Das wachsende Ressourcen- und CO_2-Problem der globalen Energiewirtschaft wirkt zusätzlich als Multiplikator für eine umfassende Integration des Wasserstoffs in die Energieversorgung der Zukunft. Ein möglicher Weg, eine solare Wasserstoff- und Energiewirtschaft, wird im folgenden Abschnitt näher beleuchtet.

3.8 Solare Wasserstoffwirtschaft

Die Notwendigkeit neuer Energiesysteme wurde bereits in Kapitel 2 ausführlich dargestellt. Eine Lösungsmöglichkeit stellt eine Umwandlung der heutigen kohlenstoffhaltigen Energiewirtschaft (offenes Energiesystem) in eine emissionslose solare Wasserstoff-energiewirtschaft (geschlossenes System) dar.

Offenes Energie-System – Kohlenstoff-Energiewirtschaft:

Die heutige Kohlenstoff-Energiewirtschaft stellt ein offenes Energie-System dar. Das offene System basiert auf fossile und nukleare Energieträger. Diese erschöpflichen Rohstoffe werden aus der Erdkruste gewonnen, weiterverarbeitet und über weite Strecken transportiert. Am Einsatzort findet eine weitere Umwandlung in die gewünschte Nutzenergieart statt. Am Ende der Energie-Umwandlungskette wird die gesamte zuvor im Energieträger gespeicherte Energie in Abwärme überführt. Die Abwärme in Form von Anergie ist letztlich technisch nicht mehr nutzbar und wird an die Geosphäre abgegeben. Neben der Abwärme entstehen bei den Umwandlungsprozessen auch zahlreiche Spalt-, Rest- und Schadstoffe, die ebenfalls in der Geosphäre gelagert werden. Die Anreicherung der Geosphäre durch Nutzung fossiler Energieträger bezieht sich sowohl auf die Atmosphäre z.B. durch erhöhte Kohlendioxid-Konzentrationen in der Luft, als auch auf die Erdkruste, z.B. durch die Einlagerung von nuklearen Abfällen. Die Problematik des offenen Systems liegt darin, dass sich die fossilen Energieträger nicht in menschlich absehbaren Zeiträumen wieder generieren können. Die über Millionen Jahre in den Rohstoffen gespeicherte Energie wird durch den Menschen innerhalb kürzester Zeiträume wieder freigesetzt. Die Folgen dieser Entwicklung sind im Augenblick nicht abschätzbar. Abbildung 3.8 zeigt eine schematische Darstellung des offenen Energie-Systems, wie es zum heutigen Zeitpunkt praktiziert wird.

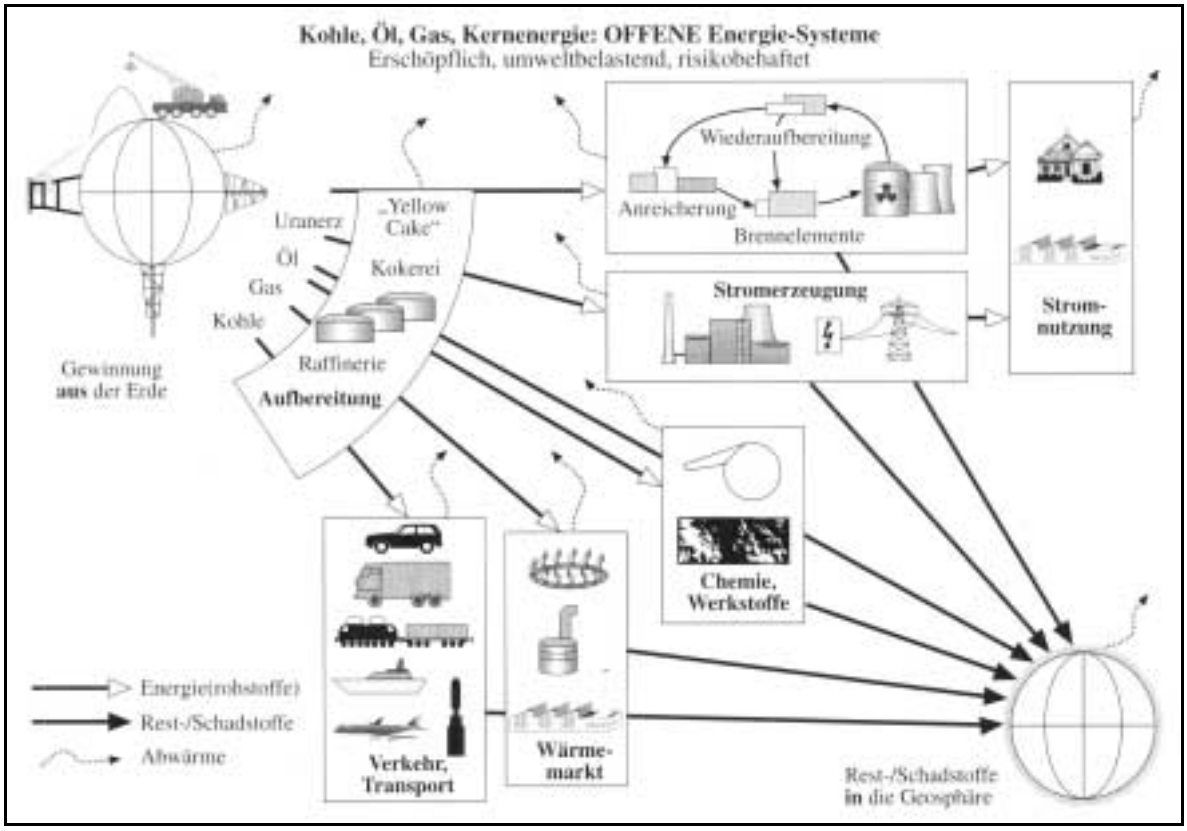

Abbildung 3.8: Offenes Energie-System der heutigen Energiewirtschaft [winter,97]

Geschlossenes Energie-System – Solare Wasserstoffenergiewirtschaft:
Das geschlossene Energie-System zeichnet sich durch einen in sich geschlossenen Stoffkreislauf aus. Dazu ist ein Stoff notwendig, der Energie speichern und auch wieder freisetzen kann. Wasserstoff bietet in diesem Zusammenhang Eigenschaften, die bislang bei keinem anderen Stoff in dieser Form bekannt sind. Allerdings ist Wasserstoff ein Sekundärenergieträger zu dessen Herstellung, Speicherung und Transport Energie aufgewendet werden muss, die unter Abzug von Verlusten bei der Rekombination wieder verfügbar wird [winter,97]. In dem geschlossenen Wasserstoff-Kreislauf dient die Sonne als kontinuierlicher Energielieferant. Unter menschlichen Maßstäben kann eine vermutliche restliche Strahlungsdauer von 4 – 5 Milliarden Jahren als unerschöpflich angesehen werden. Mit Hilfe der Sonnenenergie in all ihren Erscheinungsformen wird durch Elektrolyse Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Der Wasserstoff kann gespeichert und transportiert werden. Bei der Energienutzung in unterschiedlichster Form verbindet sich unter Freisetzung von Energie der Wasserstoff wieder mit Sauerstoff zu Wasser. Der Kreislauf ist geschlossen. Das Problem der solaren Wasserstoffwirtschaft liegt derzeit in der Erzeugung ausreichender Mengen an solarem Wasserstoff mit hohen Energiedichten aus den, mit sehr geringen Energiedichten vorkommenden, regenerativen Energien. Die Substitution fossiler Energieträger durch regenerative Systeme bei einem derzeitigen globalen Primärenergieverbrauch von rund $350 \cdot 10^3$ PJ ist mit einem gewaltigen, kaum lösbaren, technischen und finanziellen Aufwand verbunden. Abbildung 3.9 zeigt den geschlossenen Energiekreislauf mit dem Speicher- und Transportmedium Wasserstoff.

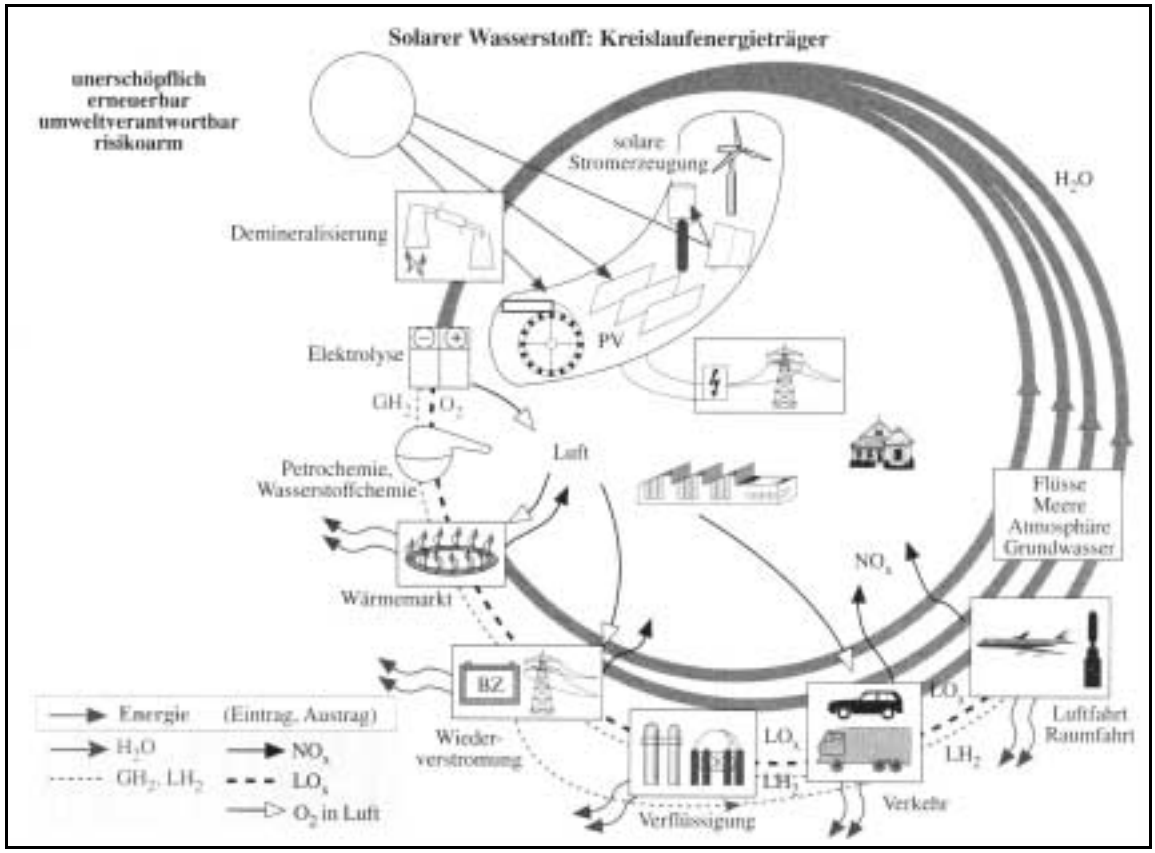

Abbildung 3.9: Geschlossener Energiekreislauf einer solaren Wasserstoffwirtschaft [winter,97]

Übergangsphase auf dem Weg zur solaren Wasserstoffenergiewirtschaft:
Der Weg zu einer solaren Wasserstoffwirtschaft ist geprägt von technischen Barrieren und einer Blockade in der Akzeptanz dieser Technologie. In den nächsten 20 – 30 Jahren wird Wasserstoff voraussichtlich nicht der Energieträger Nr. 1 werden. Die fossilen Energieträger werden den Markt weiter dominieren. Allerdings geht heute schon die Tendenz in die Richtung kohlenstoffärmerer Primärenergieträger wie Erdöl und Erdgas. Für den langen Übergang zu einer Wasserstoffenergiewirtschaft besteht die Herausforderung aus Primärenergien (fossile Energieträger, Biomasse, Abfall etc.) C-H-O Verbindungen so zu konditionieren, dass saubere Kohlenwasserstoffverbindungen, Alkohole und auch Wasserstoff zur Verfügung stehen. Die Nutzung von Biomasse und Abfällen wird für den Massenmarkt keine ausschlaggebende Rolle spielen. Die Umwandlung der erzeugten „sauberen" Sekundärenergieträger kann in Fahrzeugen und KWK-Anlagen erfolgen. Die Technologie der Brennstoffzellen wird hierbei eine zunehmende Bedeutung erlangen. Abbildung 3.10 verdeutlicht eine mögliche Übergangsphase zur einer solaren Wasserstoffwirtschaft.

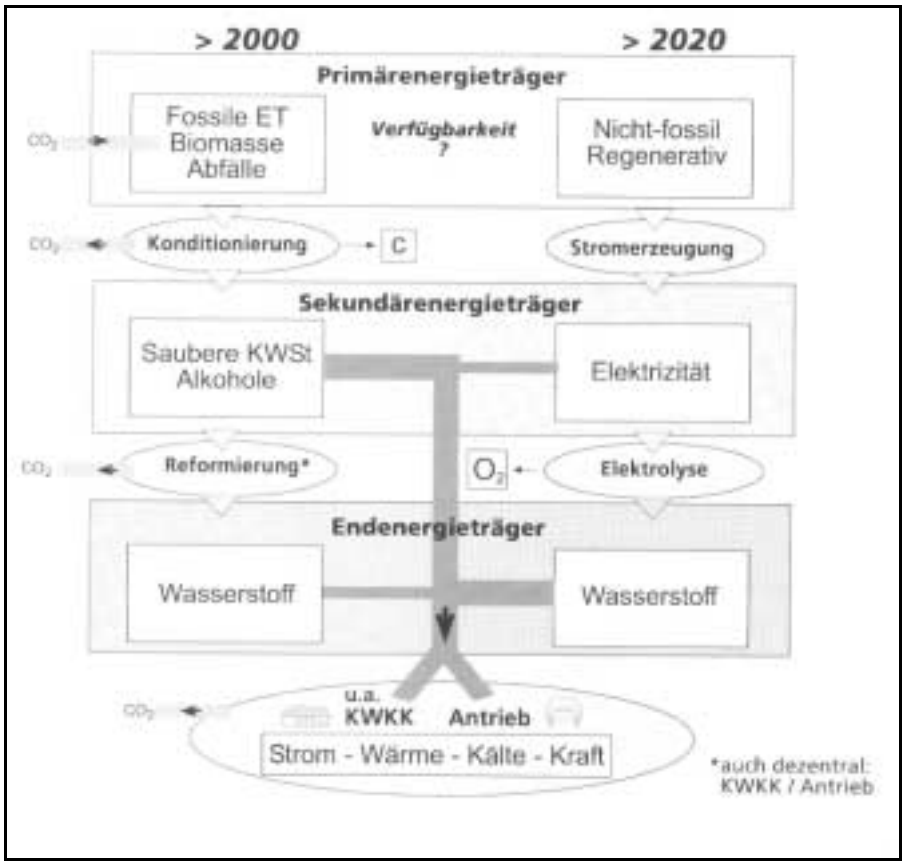

Abbildung 3.10: Entwicklung zu einer solaren Wasserstoffwirtschaft [nrw,99]

4 Brennstoffzellen

In den Studienarbeiten „Dezentrale Energiewandler“ [cholo,99] und „Perspektiven von Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung“ [strup,00] werden elementare Grundlagen der Brennstoffzellentechnologie sowie verschiedene Brennstoffzellentypen erläutert. Diese Ausführungen dienen als Basis für eine weiterführende Betrachtung der Brennstoffzellen im Kontext der vorliegenden Arbeit. Typenspezifische Ausführungen beschränken sich auf den im Versuchaufbau integrierten Typ der Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEMFC).

4.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Entdeckung des Brennstoffzelleneffektes 1838 geht auf Christian Ferdinand Schönbein zurück, der in Versuchen aus einem Elektrolyten, ohne eine chemische Umwandlung der Elektroden, elektrische Energie erzeugte [sulzer,00]. 1839 untersuchte der Engländer William Robert Growe den Effekt weiter und deutete ihn als umgekehrte Elektrolyse. Er beschrieb eine galvanische Gasbatterie, welche mittels kalter Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff elektrischen Strom erzeugt. Durch Serienschaltung versuchte er die Leistung der Einzelelemente zu erhöhen. Einer Weiterentwicklung und Verbreitung des Prinzips zur Elektrizitätserzeugung standen zu dem Zeitpunkt scheinbar unlösbare Materialprobleme im atomaren Maßstab im Wege [wurster,98]. Die weniger problembehaftete Entwicklung des elektrodynamischen Generators (Siemens 1866), des Verbrennungsmotors (Otto 1863, Diesel 1892) und der Gasturbine (Stolze 1900) ließen das Interesse an einen elektrochemischen Generator trotz seiner schon früh erkannten Vorteile sinken [oertel,97].
Die technische Weiterentwicklung der Brennstoffzelle begann kurz nach dem 2. Weltkrieg. 1954 demonstrierte Francis T. Bacon in England den Prototyp einer alkalischen Brennstoffzelle (AFC) [wurster,98]. Das erste komplette Brennstoffzellensystem mit einer Leistung von 1 kW entwickelte General Electric (GE) 1963. Es handelte sich um eine PEM-Brennstoffzelle mit einer Leistungsdichte von nur wenigen mW/cm^2, die im Gemini-Raumfahrtprogramm der USA eingesetzt wurde. Bei den Apollo- und Space Shuttle-Missionen kamen AFC`s von International Fuel Cells (IFC) zum Einsatz. Trotz deutlicher Leistungssteigerungen durch verbesserte Materialien beschränkte sich der Einsatz aufgrund der hohen Kosten auf die Raumfahrt und das Militär [ledjeff,95].
In den 70-iger Jahren begann die Entwicklung von Mittel- und Hochtemperatur-brennstoffzellen mit dem Ziel, Kraftwerksleistungen von mehreren MW zu realisieren [wurster,98]. Erst Anfang der 80er Jahre wurde die Entwicklung der Niedertemperaturzellen (vor allem die PEMFC) von Ballard Power (USA) mit Nachdruck wieder aufgenommen. Die erweiterten Einsatzgebiete für dezentrale Energieerzeuger im mobilen und stationären Bereich haben die Entwicklung verschiedener Brennstoffzellen-Systeme bis heute weit vorangetrieben. Nahezu alle Systeme sind in der Testphase oder haben schon den Sprung zur Marktreife geschafft. Zahlreiche Firmen und Forschungseinrichtungen in den USA, Europa und Japan lenken ihre Aufmerksamkeit auf die Weiterentwicklung dieser Energiesysteme.

4.2 Grundlagen der Brennstoffzelle

4.2.1 Umwandlungskette

Das Prinzip der Brennstoffzelle unterscheidet sich grundlegend von heutigen Techniken zur Elektrizitätserzeugung. Bei konventionellen Techniken wird in drei Umwandlungsschritten der Brennstoff zunächst in thermische Energie, anschließend in mechanische Energie und letztendlich in die gewünschte elektrische Energie umgewandelt. Die Brennstoffzelle hingegen erzeugt elektrische und thermische Energie mittels eines direkten elektrochemischen Umwandlungsprozesses. Abbildung 4.1 verdeutlicht die reduzierten Umwandlungsschritte der Brennstoffzelle gegenüber der konventionellen Stromerzeugung.

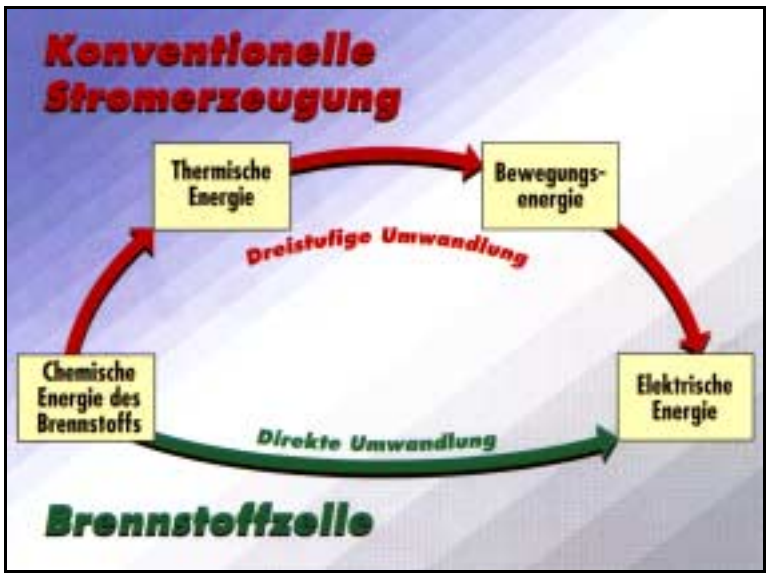

Abbildung 4.1: Umwandlungskette [stadt,99]

Im Unterschied zu anderen chemischen Energiewandlern wie Primärbatterien und Akkumulatoren ist bei der Brennstoffzelle die Energiewandlung (Leistung in kW) und die Energiespeicherung (Kapazität in kWh) entkoppelt. Die Brennstoffzelle ist der Energiewandler und das Brenngas fungiert als Energiespeicher. Bei Sicherung der Brenngaszufuhr kann im Gegensatz zu Batterien ohne zeitliche Begrenzung kontinuierlich elektrische Energie geliefert werden [nrw,99].

4.2.2 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle entspricht der Umkehrung der Elektrolyse (vgl. Kapitel 3.2.2). Wasserstoff und Sauerstoff werden unter Freisetzung elektrischer Energie, in Form von Gleichstrom, zu Wasser zusammengeführt. Im Wesentlichen besteht die Brennstoffzelle aus 2 Elektroden, der Anode und der Kathode, und einem Elektrolyten.

Der Elektrolyt hat die Aufgaben den Reaktionsraum der Gase zu separieren und einen Ionenaustausch zwischen den beiden Elektroden zu ermöglichen. Der Elektrolyt muss also gasundurchlässig und im hohen Maße ionenleitend sein. Laugen, Säuren und Feststoffe sowie Verbundstoffe mit sauren oder alkalischen Eigenschaften erfüllen diese Kriterien.

An den Elektroden erfolgt die Umsetzung der chemischen Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie. Der Massenfluss des Wasserstoffs wird in einen Fluss elektrischer Energie über den Elektrolyten und einen äußeren Stromkreis umgewandelt. Die Elektroden müssen für die drei Reaktionspartner Gasmoleküle, Ionen und Elektronen durchgängig sein. Charakteristisch für jede Brennstoffzellenelektrode ist die Ausbildung einer Dreiphasenreaktionszone aus Elektrolyt, katalytischer Oberfläche und Reaktionsgas. Anders als bei Batterien verändern sich die Eigenschaften der Elektroden über die Lebensdauer praktisch nicht oder nur in einem sehr geringen Umfang. Die Konversionsrate des Wasserstoffs lässt sich durch eine möglichst große Elektrodenoberfläche, durch Optimierung der Transportwege der aktiven Reaktionspartner und durch Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit in den elektrochemischen Grenzschichten steigern. Letzteres ist die Aufgabe der katalytischen Oberflächen der Elektrode. Je niedriger die Betriebstemperatur der Zelle, desto wichtiger wird die katalytische Beschleunigung des Reaktionsvorgangs. Bei sauren Elektrolyten können nur Edelmetalle als Katalysator eingesetzt werden, da sich andere Materialien im Laufe der Zeit auflösen würden [wurster,98].

Allgemeine Reaktionsgleichungen der umgekehrten Elektrolyse:

Anode: $2H_2 \Rightarrow 4\ H^+ + 4e^-$ (Gl. 4.1)

Kathode: $O_2 + 4\ H^+ + 4\ e^- \Rightarrow 2\ H_2O$ (Gl. 4.2)

An der Anode wird kontinuierlich Wasserstoff als Brenngas zugeführt. In Anwesenheit eines Katalysators wird dieser in Elektronen und Ionen gespalten. Die Ionen wandern durch den Elektrolyten zur Kathode. Bedingt durch die Potenzialdifferenz zwischen Anode- und Kathode fließen die Elektronen über einen externen Stromkreis (Gleichstrom) zur Kathode und können dabei an einem Verbraucher elektrische Arbeit verrichten. An der Kathode verbinden sich die Ionen und Elektronen mit Sauerstoff zu Wasser [nrw,00]. Der beschriebene Prozessablauf wird auch als „kalte Verbrennung“ bezeichnet. Abbildung 4.2 zeigt die chemischen Reaktionen in einer Brennstoffzelle am Beispiel einer PEMFC bildlich.

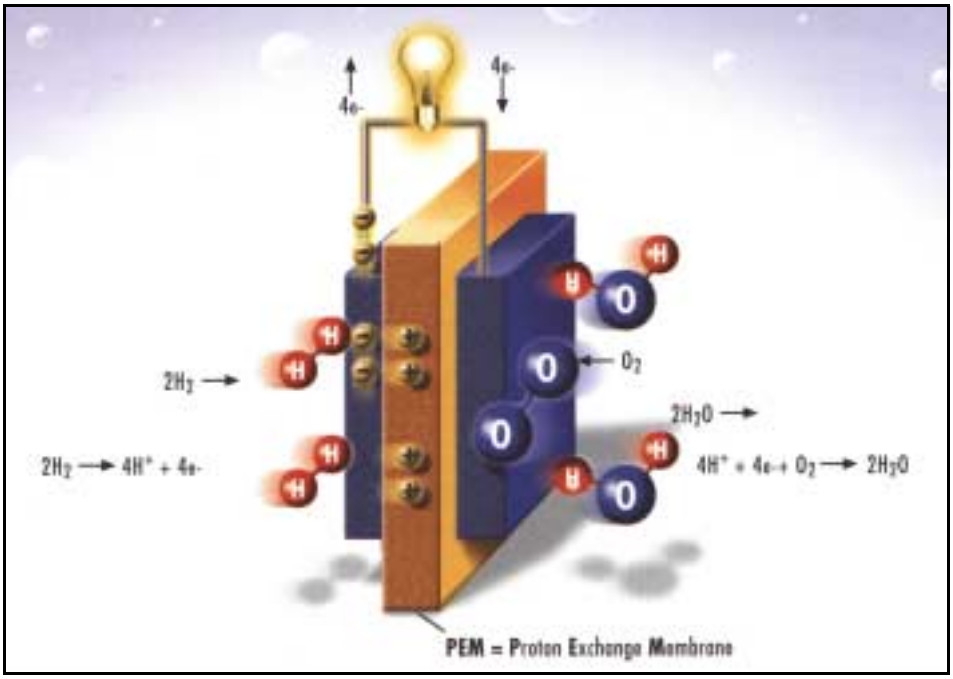

Abbildung 4.2: Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle [htec,00]

Eine vertiefende Aufschlüsselung der chemischen Reaktionen bei verschiedenen Zelltypen ist in der Studienarbeit „Perspektiven von Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung“ [strupei,00] zu finden.

4.2.3 Thermodynamik der elektrochemischen Energiewandlung

Die Energieänderung einer chemischen Reaktion bei konstantem Druck wird durch die Reaktionsenthalpie Δ^rH beschrieben. Diese ergibt sich aus der Summe der Änderung der inneren Energie ΔU und dem Produkt aus Druck und Volumen. Die innere Energie wird aus der Summe von Wärmeenergie Q und verrichteter Arbeit W bestimmt. Es gilt die Vorzeichenkonvention: Zugeführte Wärmeenergie und am System verrichtete Arbeit sind positiv, abgegebene Wärmeenergie und vom System verrichtete Arbeit dagegen negativ [kuch,96].

$$\Delta^rH = \Delta U + P\Delta V = Q - W + P\Delta V \quad \text{(Gl. 4.3)}$$

Ein Maß für die maximal gewinnbare Nutzarbeit einer reversibel geführten, isobar-isothermen chemischen Reaktion ist die freie Reaktionsenthalpie Δ^rG. Sie entspricht der Reaktionsenthalpie Δ^rH, reduziert um die, an die Umgebung reversibel abgegebene, Wärmemenge $Q_{rev} = T\Delta^rS$. Findet keine Wärmeabgabe an die Umgebung statt, ist auch die Entropieänderung $dS= Q_{rev} / T$ gleich null. Die Reaktionsenthalpie Δ^rH ist gleich der freien Reaktionsenthalpie Δ^rG und die Reaktion ist reversibel (Bedingung $dS = 0$) [kuch,96] [helio1,99].

$$\Delta^rG = \Delta^rH - Q_{rev} = \Delta^rH - T\Delta^rS \qquad \text{(Gl. 4.4)}$$

Für die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser ergeben sich für die Reaktionsenthalpie und die freie Reaktionsenthalpie bei Standardbedingungen folgende Werte [helio1,99]:

Reaktion: $2H_2 + O_2 \Rightarrow 2\ H_2O$

$\Delta^rH = -242{,}0$ kJ/mol
$\Delta^rG = -237{,}3$ kJ/mol

Die Wasserstoff-Sauerstoff-Reaktion besitzt eine negative Entropieänderung. Ist der Wert der freien Reaktionsenthalpie Δ^rG weniger negativ als die Reaktionsenthalpie Δ^rH verläuft die Reaktion exotherm.

Findet die Reaktion als Verbrennung statt, wird die Reaktionsenthalpie vollständig in Wärme umgewandelt:

$$\Delta^rH = Q \qquad \text{(Gl. 4.5)}$$

Bei der elektrochemischen Reaktion steht W in Gleichung 4.3 für die Summe aus Volumenarbeit und die von den wandernden Elektronen verrichtete elektrische Arbeit W_{el}.

$$W = W_{el} + P\Delta V \qquad \text{(Gl. 4.6)}$$

$$W_{el} = n\ F\ (\varphi_{rev,K} - \varphi_{rev,A}) \qquad \text{(Gl. 4.7)}$$

mit *n: Anzahl der Elektronen*
F: Faraday-Konstante 96.487 C/mol

Der Term $(\varphi_{rev,K} - \varphi_{rev,A})$ beschreibt die Potenzialdifferenz zwischen Anode und Kathode und wird als reversibles Standardpotenzial oder theoretische Gleichgewichtsspannung U_{rev} bezeichnet.

Aus Gleichung 4.3, 4.4 und 4.7 ergibt sich für die freie Reaktionsenthalpie Δ^rG der elektrochemischen Reaktion und somit für die Gleichgewichtsspannung:

$$\Delta^rG = -\ n\ F\ (\varphi_{rev,K} - \varphi_{rev,A}) \qquad \text{(Gl. 4.8)}$$

$$\Delta^rG = -\ n\ F\ U_{rev} \qquad \text{(Gl. 4.9)}$$

Die Brennstoffzelle ist bei reversibler Reaktionsführung in der Lage, die freie Reaktionsenthalpie vollständig in elektrische Energie umzuwandeln. Für die Wasserreaktion errechnet sich unter Standardbedingungen eine Gleichgewichtsspannung der Zelle von 1,23 V. Der Wert verkleinert sich bei steigenden Temperaturen und vergrößert sich bei höheren Drücken [helio1,99]. Bei technischen Zellen beträgt die Zellspannung durch höhere Betriebstemperaturen und verschiedene Verluste 0,6 – 0,9 V [ledjeff,95].

4.3 Wirkungsgrade

Der elektrische Wirkungsgrad eines chemischen Energiewandlers ist definiert als Verhältnis von erzeugter elektrischer Energie zur freigesetzten Reaktionsenergie $\Delta^r H$.

$$\eta = W_{el} / \Delta^r H \qquad \text{(Gl. 4.10)}$$

In Anlehnung an die Verbrennungstechnik verwendet man üblicherweise den unteren Heizwert H_u oder je nach Anwendungsfall auch den oberen Heizwert (Brennwert) H_o anstelle der Reaktionsenthalpie $\Delta^r H$.

$$\eta = W_{el} / H_u \qquad \text{(Gl. 4.11)}$$

4.3.1 Theoretischer elektrischer Wirkungsgrad

Bei Wärme-Kraft-Maschinen wird der maximal theoretische Wirkungsgrad durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt.

$$(\eta = 1 - T / T_0) \qquad \text{(Gl. 4.12)}$$

Bei der chemischen Energiewandlung in Brennstoffzellen wird aus der zuvor beschriebenen Thermodynamik der reversiblen Reaktion deutlich, dass im Idealfall die freie Reaktionsenthalpie $\Delta^r G$ vollständig in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Der maximal theoretische Wirkungsgrad (Gibbs`scher Wirkungsgrad) ergibt sich somit aus Gleichung 4.10 als Verhältnis der freien Reaktionsenthalpie zur Reaktionsenthalpie:

$$\eta_{rev} = \Delta^r G / \Delta^r H \qquad \text{(Gl. 4.13)}$$

Die Reaktionenthalpie und die freie Reaktionsenthalpie sind nur schwach temperaturabhängig. Für den theoretischen Wirkungsgrad ergibt sich ein linearer Temperaturverlauf. Bei höheren Temperaturen nimmt der theoretisch mögliche Wirkungsgrad ab. Aus thermodynamischen Gründen sollten die Betriebstemperaturen der Zellen möglichst gering gehalten werden, auch wenn bei einigen Zelltypen aus Gründen der allgemeinen Prozessverbesserung eine Temperaturerhöhung vorgenommen wird. Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf des theoretischen thermodynamischen Wirkungsgrades von Brennstoffzellen und des Carnot-Wirkungsgrades von Wärme-Kraft-Maschinen bei Temperaturerhöhung. Ein unmittelbarer Vergleich der beiden Wirkungsgrade zeigt, dass erst bei Temperaturen von 1.100 K der Carnot-Wirkungsgrad Werte der idealen Brennstoffzelle erreicht. Bei niedrigeren Prozesstemperaturen liegen die theoretischen Wirkungsgrade der Brennstoffzellen im Vergleich deutlich höher.

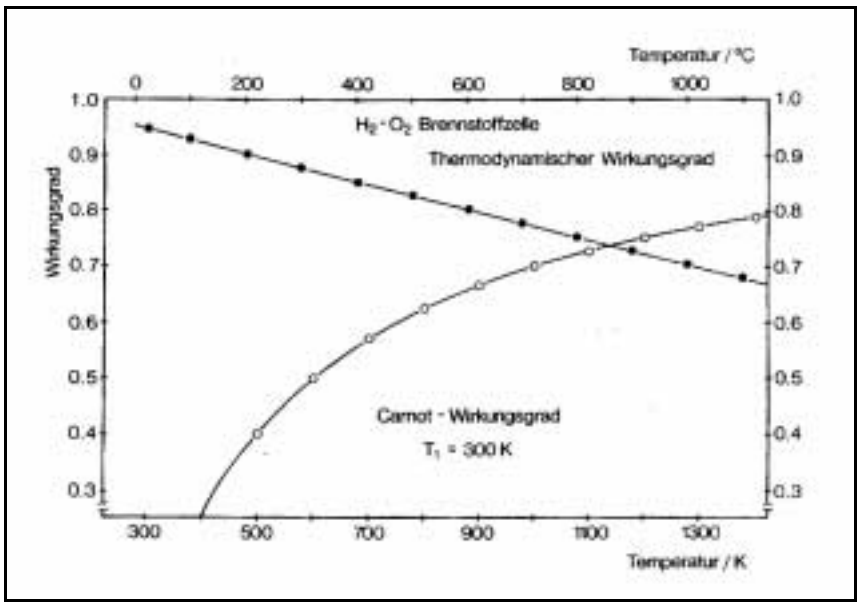

Abbildung 4.3: Thermischer Wirkungsgrad und Carnot-Wirkungsgrad bei Temperaturerhöhung [nrw,99]

4.3.2 Spannungswirkungsgrad

In der Praxis kann der maximale theoretische Wirkungsgrad nicht erreicht werden, da die Reaktion irreversibel abläuft. Ein Maß für die Effizienz der elektrochemischen Energiewandlung ist der Spannungswirkungsgrad η_U. Die freie Reaktionsenergie in Gleichung 4.10 wird auf der Grundlage der Kenntnisse über den theoretischen Wirkungsgrad durch die freie Reaktionsenthalpie $\Delta^r G$ beschrieben. Die elektrische Energie an der Klemme der Zelle ergibt sich nach Gleichung 4.7. Unter Verwendung von Gleichung 4.9 ergibt sich:

$$\eta_U = W_{el} / \Delta^r G$$

$$\eta_U = -n\ F\ U_K / \Delta^r G$$

$$\eta_U = U_K / U_{rev} \qquad \text{(Gl. 4.13)}$$

Der Spannungswirkungsgrad wird durch das Verhältnis der real gemessenen Klemmenspannung U_K zur Gleichgewichtspannung U_{rev} der Zelle beschrieben. Die Klemmenspannung ist immer kleiner als die Gleichgewichtsspannung der Zelle und von der Stromstärke abhängig [helio1,99].

Der Spannungsverlust in Form einer Spannungsdifferenz zwischen Klemmenspannung und Gleichgewichtsspannung wird als Überspannung bezeichnet und setzt sich zusammen aus:

- Durchtrittüberspannung
  Verluste infolge der katalytischen Vorgänge an den Elektroden (maßgeblich bei kleinen Strömen)
- Überspannung durch den Innenwiderstand
  Ohmsche Verluste im Elektrolyt und in den Stromkollektoren (maßgeblich bei mittleren Strömen)
- Diffusionsüberspannung
  Verluste infolge der begrenzten Diffusionsfähigkeit der Gase in der Elektrodenstruktur (maßgeblich bei hohen Strömen)

Ist die energetische Gesamteffizienz des Prozesses in Bezug auf den eingesetzten Brennstoff von Interesse, bezieht man den Spannungswirkungsgrad auf den Heiz- oder Brennwert des jeweiligen Energieträgers. Es gilt für den Prozess:

$$\eta_U^* = \eta_{rev} \ \eta_U$$

$$\eta_U^* = (\Delta^r G / \Delta^r H) \cdot (- n F U_K / \Delta^r G)$$

$$\eta_U^* = -n F U_K / \Delta^r H \qquad \text{(Gl. 4.14)}$$

In Anlehnung an die Verbrennungstechnik kann für die Reaktionsenthalpie $\Delta^r H$ auch der Heizwert H_U oder je nach Anwendungsfall auch der Brennwert H_O verwendet werden. Durch Verwendung der Gleichung 4.9 zur Bestimmung der elektrischen Spannung ergibt sich:

$$\eta_U^* = U_K / U_H \qquad \text{(Gl. 4.15)}$$

Für U_H ergeben sich unter Einbeziehung des Heiz- bzw. Brennwertes und der molaren Masse von Wasserstoff (vgl. Tabelle 3.1) Gleichgewichtsspannungen von:

Heizwert H_U : 119.972 kJ/kg = 241,9 kJ/mol
Brennwert H_O : 141.890 kJ/kg = 286,1 kJ/mol

U_{Hu} = 1,254 V
U_{Ho} = 1,482 V

4.3.3 Stromwirkungsgrad

Der Stromwirkungsgrad oder Faradaywirkungsgrad integriert die Verluste durch unvollständige Brennstoffausnutzung in die Wirkungsgradbetrachtung. Die Verluste treten vor allem infolge von elektrochemischen Nebenreaktionen und Undichtigkeiten auf. Der Stromwirkungsgrad ist das Verhältnis des gemessenen Stroms zu dem, anhand des zugeführten Wasserstoffvolumenstroms mit Hilfe des 1. Faradayschen Gesetzes berechneten, theoretisch möglichen Stroms I_{th}.

$$\eta_I = I / I_{th} \qquad \text{(Gl. 4.16)}$$

$$I_{th} = V^* \ F \ z / V_m \ n \qquad \text{(Gl. 4.17)}$$

mit V^* : *Wasserstoff-Volumenstrom in l/s*
F : *Faradaykonstante 96485 C/mol*
z : *Anzahl der Elektronen je Teilchenumsatz der Reaktion: z = 2*
V_m: *Molares Volumen bei 0 °C in l/mol:*
Im Normzustand (p_n= 101,325 kPa; T_n = 273,15 K) besitzt die Stoffmenge 1 mol eines jeden Gases das gleiche Volumen. Man nennt es molares Normvolumen V_{mn} 22,41410 l/mol [kuch,96]
n: *Anzahl der Zellen im Stack*

4.3.4 Gesamtwirkungsgrad

Der Gesamt- oder auch Energiewirkungsgrad einer Brennstoffzelle ergibt sich zu:

$$\eta_E = \eta_{rev}\, \eta_U\, \eta_I \qquad \text{(Gl. 4.18)}$$

Bei der Betrachtung eines Brennstoffzellensystems muss zusätzlich noch ein Systemwirkungsgrad η_{sys} für den Energiebedarf der Peripherie wie Pumpen, Heizung, Kühlung, Kompression etc. integriert werden.

$$\eta = \eta_{rev}\, \eta_U\, \eta_I\, \eta_{sys} \qquad \text{(Gl. 4.19)}$$

Abbildung 4.4 zeigt den Verlauf des Wirkungsgrades einer Einzelzelle und eines Zellen-Stacks über die Stromstärke.

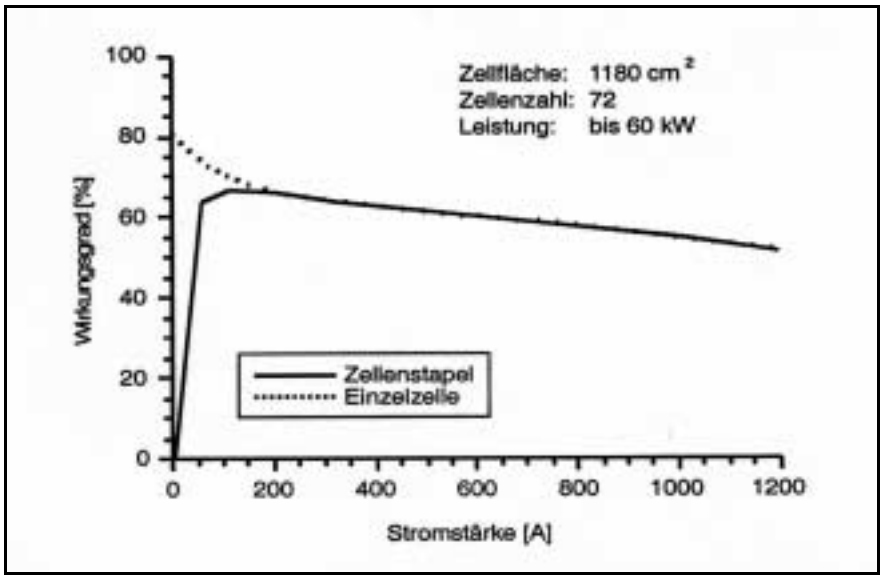

Abbildung 4.4: Wirkungsgradverlauf einer Einzelzelle und eines Zellstapels [helio1,99]

In der Praxis versucht man eine Brennstoffzelle mit möglichst großer Leistung und damit bei einem möglichst großen Strom zu betreiben. Wie in Abbildung 4.4 ersichtlich, nimmt bei steigender Stromstärke der Wirkungsgrad der Zelle ab und die thermische Verlustleistung wird größer. Die Wirkungsgrad-Charakteristik einer Einzelzelle ist mit dem Kurvenverlauf des Spannungswirkungsgrades identisch. Bei Einzelzellen sind Strom- und Systemwirkungsgrad nahezu 100 %. Beim Zellenstapel kommt es zu vermehrten Leckagen und chemischen Nebenreaktionen, so dass der Stromwirkungsgrad an Bedeutung gewinnt. Der Systemwirkungsgrad wirkt sich besonders bei kleinen Strömen negativ auf den Gesamtwirkungsgrad des Brennstoffzellensystems aus.

4.3.5 Wirkungsgradvergleich

In Abbildung 4.5 sind die real erzielbaren Wirkungsgrade verschiedener Brennstoffzellentypen als Funktion der elektrischen Leistung im Vergleich zu konkurrierenden Systemen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass Brennstoffzellen über das gesamte Leistungsspektrum bessere Wirkungsgrade erzielen als die konventionellen Techniken. Besonders aber in kleineren Leistungsklassen zeigt sich der enorme Vorsprung der Brennstoffzelle. Damit besitzen Brennstoffzellen beste Voraussetzungen um in der Kraft-Wärme-Kopplung oder in mobilen Antrieben Anwendung zu finden.

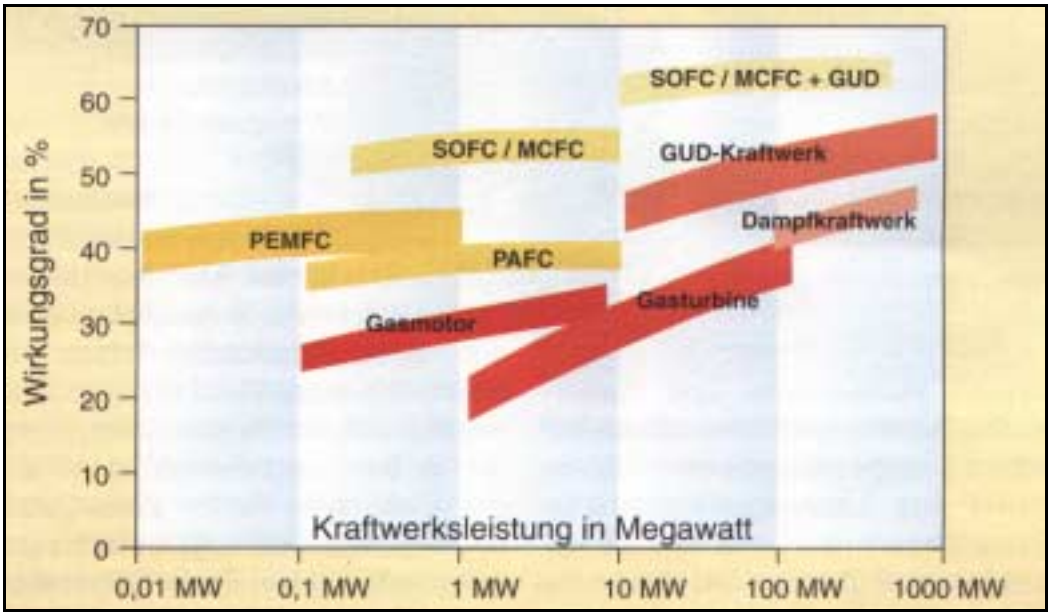

Abbildung 4.5: Wirkungsgradvergleich konventioneller Techniken mit der Brennstoffzelle [leusch,99]

4.4 Elektrodenkinetik

Bei Brennstoffzellen ist ähnlich wie bei Batterien und Akkumulatoren die Leerlaufspannung größer als die Lastspannung. Diese Spannungsdifferenz bezeichnet man als Polarisation oder Überspannung. Die Spannungsverluste sind abhängig von der Stromdichte und werden bestimmt durch die Kinetik der Elektrodenreaktionen, das Design der Zelle und der Art des Elektrolyten. Die Summe der Überspannung einer Zelle setzt sich aus mehreren Einzelüberspannungen zusammen. Die folgenden Einzelüberspannungen sollen anhand des Kennlinienverlauf einer Brennstoffzelle näher untersucht werden (vgl. Kapitel 4.3.2):

- Abweichung vom idealen Gleichgewichtszustand
- Durchtrittüberspannung
- Überspannung durch den Innenwiderstand
- Diffusionsüberspannung

Abbildung 4.6 zeigt den charakteristischen Verlauf einer Strom-Spannungs-Kennlinie einer Brennstoffzelle. Der mathematische Zusammenhang zwischen Zellspannung und Stromdichte kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$U = U_0 - b \log i - R\ i \qquad \text{(Gl. 4.20)}$$

$$U_0 = U_{rev} + b \log i_0 \qquad \text{(Gl. 4.21)}$$

mit

U	*Zellspannung*
U_0	*Leerlaufspannung*
U_{rev}	*thermodynanische Gleichgewichtsspannung*
i	*Stromdichte*
i_0	*Austauschstromdichte*
R	*Innenwiderstand der Zelle*
b	*Tafelneigung*

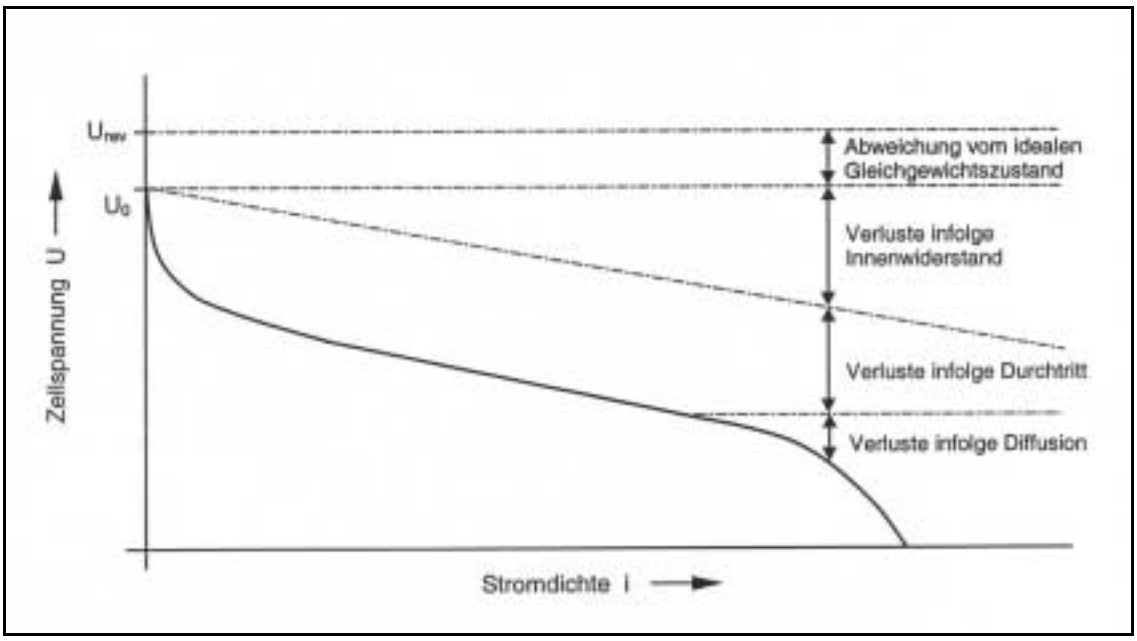

Abbildung 4.6: Strom-Spannungskennlinie einer Brennstoffzelle [helio1,99]

Abweichung vom idealen Gleichgewichtszustand:
Bei einer Stromdichte von null entstehen Spannungsverluste durch ungewollte Nebenreaktionen an der Anode. Als ungewollte Nebenreaktion gilt als Beispiel die Oxidation von Verunreinigungen im Elektrodenmaterial oder Oxidationsvorgänge am Katalysator. Die messbare Leerlaufspannung U_0 liegt bei einer H_2/ O_2-Zelle um 100 bis 200 mV unter der thermodynamischen Gleichgewichtsspannung U_{rev}. Dieser Spannungsverlust stellt sich in Abbildung 4.6 durch eine Abweichung vom idealen Gleichgewichtszustand dar.

Durchtrittsüberspannung:
Bei kleinen Stromdichten bis zu 10 mA/cm^2 nimmt die Zellspannung exponentiell ab. Verantwortlich hierfür sind die Verluste der katalytischen Vorgänge an den Elektroden. Durch eine Verbesserung der Struktur der Drei-Phasen-Reaktionszone konnten in der laufenden Entwicklung diese Überspannungen schon deutlich reduziert werden. Man bezeichnet Verluste dieser Art als Durchtrittsüberspannung. Sie ist ein Maß für die Güte des Verlaufs der chemischen Reaktion in der Brennstoffzelle. Die Diffusionsüberspannung und die Überspannung durch den Innenwiderstand können in diesem Bereich vernachlässigt werden.

Überspannung durch den Innenwiderstand:
Den Bereich mittlerer Stromdichten bestimmt die Überspannung am Innenwiderstand der Zelle durch ohmsche Verluste im Elektrolyt und in den Stromkollektoren. Dieser Bereich ist aufgrund der Proportionalität zwischen Stromdichte und Innenwiderstand durch einen linearen Verlauf gekennzeichnet. Bei großen Brennstoffzellen ist eine Begrenzung dieses Bereiches notwendig um große thermische Verlustleistungen infolge hoher Ströme zu verhindern.

Diffusionsüberspannung:
Ab einem bestimmten Wert der Stromdichte fällt die Zellspannung steil auf fast null ab. Ursache für die Entstehung der Diffusionsspannung ist der begrenzte Stofftransport durch die eingeschränkte Diffusionsfähigkeit der Gase in der Elektrodenstruktur. Für große Stromdichten ist eine ausreichende Versorgung der Zelle mit den Reaktanten und die Abfuhr des Reaktionsproduktes nicht gewährleistet.

Zielsetzung einer Weiterentwicklung der Brennstoffzellen-Technologie ist, die Verluste durch die verschiedenen Überspannungen zu minimieren. Dies erscheint durch folgende Maßnahmen realisierbar:

- Minimierung der Durchtrittüberspannung durch wirksamere Katalysatoren und höhere Prozesstemperaturen
- Minimierung der Diffusionsüberspannung durch verbesserte Elektrodenstrukturen und Gasführungen
- Minimierung der Überspannungen am Innenwiderstand der Zelle durch verbesserte Leitfähigkeit der Kontaktierungen und Elektrolytmaterialien

4.5 Kennlinien

4.5.1 Spannungs-Strom-Kennlinien

Abbildung 4.7 zeigt die Spannungs-Strom-Kennlinie einer Brennstoffzelle (a). Die Ursachen für den charakteristischen Kurvenverlauf in Form von unterschiedlichen Überspannungen wurden bereits in der Elektrodenkinetik (Kapitel 4.4) ausführlich begründet.

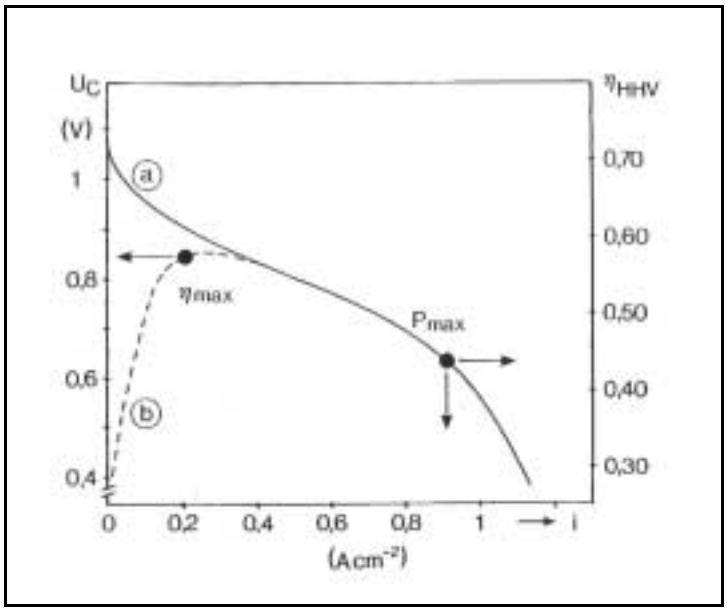

Abbildung 4.7: Strom-Spannungskennlinie einer Brennstoffzelle [nrw,99]

4.5.2 Leistungskurve

Aus den Strom- und Spannungswerten der Kennlinie (a) in Abbildung 4.7 lässt sich eine Leistungskurve entwickeln und ein Punkt maximal erreichbarer Leistung P_{max} festlegen. In Abbildung 4.7 ist der Punkt P_{max} eingetragen. Der ebenfalls skizzierte Verlauf des Wirkungsgrades (b) des Zellstapels (vgl. Abbildung 4.4) zeigt die Diskrepanz zwischen den Punkten maximaler Leistung und maximalen Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle ist nicht konstant, sondern fällt mit steigender Stromdichte ab. Die Leistung der Zelle dagegen steigt mit steigender Stromdichte bis zu einem bestimmten Punkt kontinuierlich an. In der Praxis muss ein Kompromiss zwischen optimalen Wirkungsgrad und maximaler Leistung der Zelle gefunden werden.

4.6 Eigenschaften von Brennstoffzellen

Neben dem schon diskutierten Charakteristikum der generell besseren Wirkungsgrade von Brennstoffzellen gegenüber konventioneller Elektrizitätserzeugung, bietet die Brennstoffzellen-Technologie weitere Merkmale, die zur Überlegenheit des Systems beitragen [heim,99] [nrw,00].

Hoher Wirkungsgrad bei Voll- und auch Teillastbetrieb:
Wie schon in Kapitel 4.3.5 näher ausgeführt, ist der Wirkungsgrad von Brennstoffzellen generell höher als der konventioneller Techniken. In der Beurteilung der Wirkungsgrade spielt aber nicht der Zellwirkungsgrad sondern vielmehr der Gesamtwirkungsgrad des Systems eine entscheidende Rolle [heim,99]. Bennstoffzellen erreichen elektrische Systemwirkungsgrade je nach Zelltyp von 35 bis 70 %. Durch Ausnutzung der Abwärme vor allem bei den Hochtemperaturzellen lässt sich der Gesamtwirkungsgrad auf bis zu 90 % steigern (vgl. .Tabelle 4.1). Ein weiterer Vorteil gegenüber anderen Wandlertechniken ist, dass der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen nicht nur unter Volllast hoch ist. Im Teillastbetrieb arbeitet das System sogar noch effektiver (vgl. Abbildung 4.7).

Hohe Stromkennzahl:
Die Stromkennzahl beschreibt das Verhältnis von erzeugter elektrischer Energie zur erzeugten Nutzwärme und wird zur Beurteilung von KWK-Anlagen herangezogen. Mit steigender Leistung der Zelle nimmt die Stromkennzahl ab. Im Auslegungspunkt kann man von einer Stromkennzahl von 0,8 ausgehen. Im Teillastbetrieb steigt diese auf 1,2 und im Überlastbereich reduziert sie sich auf rund 0,6 [nrw,99]. Bei einem stationären Betrieb kann die Stromkennzahl bedarfsgerecht angepasst werden [bine,98]. Herkömmliche thermodynamische KWK-Anlagen im Leistungsbereich von 5 kW bis 100 MW besitzen Stromkennzahlen im Bereich von 0,2 bis 1,0 [oertel,97]. Abbildung 4.8 verdeutlicht die Abhängigkeit der Stromkennzahlen von der Zell-Leistung und der Stromdichte am Beispiel einer PEMFC.

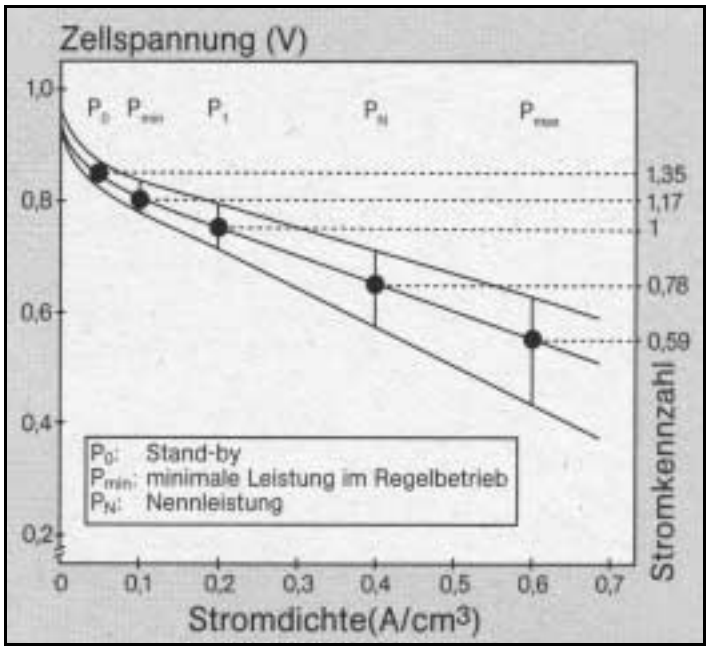

Abbildung 4.8: Stromkennzahlen einer PEMFC bei unterschiedlichen Arbeitspunkten [bine,98]

Gute Regelbarkeit:
Die elektrische Ausgangsleistung von Brennstoffzellen lässt sich stufenlos einem weiten Lastbereich anpassen. Dadurch kann das System auch schwankenden Lastverläufen problemlos folgen. Nachteilig wirken sich die langen Anfahrzeiten der Brennstoffzellen aus. Besonders die Hochtemperaturzellen benötigen nach längerer Stillstandszeit eine Aufheizphase des Zellblocks im Bereich von Tagen. Niedertemperaturzellen sind aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus wesentlich schneller anzufahren. Generell sollten Brennstoffzellen aber permanent auf Arbeitstemperatur gehalten werden und im Grundlastbetrieb laufen [heim,99].

Modularität:
Durch den vollständig modularen Aufbau des Zellblocks können theoretisch nahezu alle geforderten Leistungen abgedeckt werden. Allerdings werden aus Gründen der technischen und wirtschaftlichen Umsetzung Unter- und Obergrenzen für die Modulleistung der einzelnen Zelltypen angegeben (vgl. Tabelle 4.1). Aus den meist schon vorgefertigten Modulen können wiederum größere Kraftwerksleistungen problemlos zusammengesetzt werden. Die Modulbauweise überzeugt durch eine hohe Flexibilität und lässt sich ohne große bauliche Veränderungen an die Bedürfnisse der Kunden anpassen. Sowohl Erweiterungen als auch Reduzierungen der Kraftwerksleistung sind in kurzen Zeiträumen und mit überschaubaren Investitionen realisierbar. Die Modularität von Brennstoffzellensystemen ist eine gute Ausgangsposition für die Anwendung in der dezentralen Energieerzeugung [heim,99].

Geringer zu erwartender Wartungsaufwand:
Wartungsarbeiten sind nur an den peripheren Einrichtungen der Brennstoffzellenanlage möglich und notwendig. Erfahrungen über die nötigen Wartungsintervalle und -maßnahmen der Peripherie sind aus der konventionellen Wasserstoff- und Gastechnik bereits vorhanden. Der Zellblock unterliegt keiner Wartung. Am Ende der Lebensdauer wird dieser durch einen neuen Block ausgetauscht. Der Wartungsaufwand im Betrieb reduziert sich dadurch auf ein Minimum.

Geringer Geräuschpegel:
Die elektrochemische Umwandlung in Brennstoffzellen besitzt keinerlei bewegliche Teile und verursacht somit auch keine Geräusche. Die peripheren Einrichtungen wie Lüfter, Pumpen etc. erzeugen allerdings Geräuschemissionen. Durch geeignete Dämmmaßnahmen lassen sich diese auf ein Minimum reduzieren und sind in keiner Weise mit dem Lärmpegel konventioneller Anlagen wie Motoren oder Gasturbinen zu vergleichen.

Geringe Schadstoffemissionen:
Der bedeutendste Vorteil der Brennstoffzellen gegenüber konventionellen Energiewandlern liegt in den reduzierten Schadstoffemissionen. Durch die im Vergleich niedrigen Arbeitstemperaturen entstehen praktisch keine Stickoxide. Schwefelverbindungen in den Emissionen werden durch eine Schwefelreinigung des Brenngases nahezu ausgeschlossen. Die höheren System-Wirkungsgarde der Brennstoffzellen führen einer Verminderung des Kohlendioxid-Ausstoßes gegenüber modernen Gas- oder Kohlekraftwerken. Das eigentliche Potenzial für eine zukünftige Energiepolitik liegt aber in der Anwendung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff. Dieser würde keinerlei Schadstoffemissionen verursachen (vg. Kapitel 3.8). Abbildung 4.9 zeigt einen Vergleich der Schadstoffemissionen eines erdgasbetriebenen Brennstoffzellen-Kraftwerks zur konventionellen Kraftwerkstechnik zur Elektrizitätserzeugung.

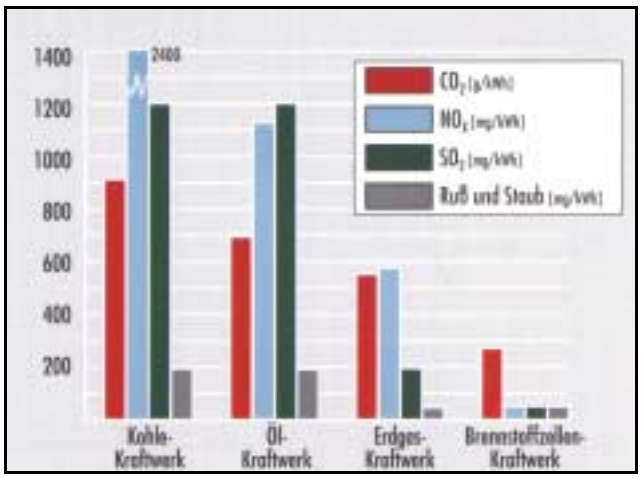

Abbildung 4.9: Schadstoffemissionen verschiedener Kraftwerkstypen im Vergleich [stadt,99]

Hohes Entwicklungspotenzial:
Die Brennstoffzellen-Technologie bietet ein hohes Entwicklungspotenzial. Durch die Entwicklung verbesserter und kostengünstiger Materialien, einer Optimierung der Prozessabläufe und einer intelligenten Regelung und Steuerung lassen sich Brennstoffzellen-Systeme weiter optimieren und den Bedürfnissen einer modernen Energiewirtschaft anpassen. Einer Kommerzialisierung zum heutigen Zeitpunkt stehen fehlende Betriebserfahrungen im ausreichenden Maße im Wege. Viele Systeme werden erst seit einigen Jahren unter realistischen Bedingungen betrieben. Aus diesem Grunde fehlt auch noch ein aussagekräftiger Nachweis über die Lebensdauer der Brennstoffzellensysteme. Man rechnet mit einer Lebensdauer von ca. 5 Jahren für den Zellblock und mit 15 Jahren für die Peripherieeinrichtungen [heim,99].

4.7 Übersicht Zellentypen

Die verschiedenen Brennstoffzellentypen unterscheiden sich im Wesentlichen in der Art ihres Elektrolyten und somit in der Betriebstemperatur der Zelle. Darauf beruht auch die Einordnung der Zelltypen in zwei Kategorien. Die alkalische Brennstoffzelle (AFC), die Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEMFC) und die phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC) gehören zu der Kategorie der Niedertemperaturzellen. Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) und die oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC) ordnet man den Hochtemperaturzellen zu. Vom Grundprinzip arbeiten alle Zellen mit Wasserstoff als Brennstoff. Als Energielieferant kommen aber auch andere Brennstoffe in Frage. Vor allem die Hochtemperaturzellen nutzen die hohe Betriebstemperatur, um vorhandene und besser transportierbare Brennstoffe wie Erdgas direkt einsetzen zu können. Aus den Brennstoffen wird der Wasserstoff durch Reformingprozesse gewonnen, die der eigentlichen Brennstoffzelle vorgeschaltet sind. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Kenndaten der verschiedenen Brennstoffzellensysteme.

Brennstoff-zellentyp	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Kategorie	Niedertemperatur			Hochtemperatur	
Elektrolyt	Kalium-hydrooxid (Kalilauge)	Polymer-membran	Phosphorsäure	Geschmolzenes Lithium-karbonat / Kaliumkarbonat	Yttrium-stabilisiertes Zirkonoxid
Brennstoff	Reinster Wasserstoff	Erdgas Methanol Wasserstoff	Erdgas Wasserstoff (Biogas)	Erdgas Kohlegas Biogas Wasserstoff	Erdgas Kohlegas Biogas Wasserstoff
Oxidant	Reinster Sauerstoff	Sauerstoff Luft	Sauerstoff Luft	Sauerstoff Luft	Sauerstoff Luft
Betriebs-temperatur	60 – 100°C	60 – 100°C	160 – 220°C	600 – 650°C	800 – 1000°C
Temperaturniveau der auskoppel-baren Nutzwärme	k. A.	40 – 70 °C	60 – 120° C	400 – 420°C	300 – 600°C
elektrischer Systemwirkungsgrad (Neuzustand)	60 – 70 %	35 – 45 % [6]	40 – 42 % [6]	ca. 55 % [6]	ca. 55 % [6]
Gesamtnutzungs-grad im KWK-Betrieb	k. A.	75-80 %	70-80 %	90 %	90 %
Leistungsdichte W/ cm^2	0,3-0,5 W/ cm^2	0,3-0,9 W/ cm^2	0,15-0,3 W/ cm^2	0,15 W/ cm^2	0,15-0,7 W/ cm^2
Elektrische Modulgrößen	20-100 kW	3- 250 kW	200-500 kW	280 kW	1-100 kW
Bedeutendste Entwickler/ Hersteller	IFC (USA)	Ballard Power (C) Siemens (D) DeNora	ONSI (USA) Fuji (Japan)	MC-Power (USA) ERC (USA) MTU (D)	Siemens-Westinghouse Sulzer (CH)
Spezifische Investitions-kosten 1999	k. A.	20.000 DM/kW_{el}	7500 DM/kW_{el}	k. A.	k. A.
Zielvorgabe spezifische Investitions-kosten bei Serienfertigung	k. A.	Stationär: 1000 DM/kW_{el} Mobil: 100 DM/kW_{el}	2200 DM/kW_{el}	2000 DM/kW_{el}	1800 DM/kW_{el}

[1] AFC: alcaline fuel cell; Alkalische Brennstoffzelle
[2] PEMFC: proton exchange membrane fuel cell; Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle
[3] PAFC: phosphoric acid fuel cell; Phosphorsaure Brennstoffzelle
[4] MCFC: molton carbonate fuel cell; Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle
[5] SOFC: solid oxide fuel cell; oxidkeramische Brennstoffzelle
[6] Brennstoff Erdgas

Tabelle 4.1: Kenndaten verschiedener Brennstoffzellentypen [vdew,99]

4.8 Anwendungen von Brennstoffzellen

Die Anwendungsfelder von Brennstoffzellen liegen im Kern in der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie. Die Anwendungsbereiche teilen sich auf in den stationären Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und den mobilen Einsatz. Während bei der KWK die elektrische und thermische Energie genutzt wird, ist im mobilen Einsatz in Fahrzeugen nur die elektrische Energie von Bedeutung. Im mobilen Einsatzfeld finden aus diesem Grund vorwiegend die Niedertemperaturzellen einen Anwendungsfall.

Tabelle 4.2 macht die Anwendungsfelder der einzelnen Brennstoffzellentypen deutlich und gibt eine Aussage über eine mögliche zeitliche Verfügbarkeit der Technik.

Brennstoff-zellentyp	Wahrscheinlichste Anwendungsfelder	Verfügbarkeit
AFC	Raumfahrtanwendungen; militärische Spezialanwendungen	heute schon eingesetzt
PEM	Stationäre Anwendungen für direkten Wasserstoffeinsatz	1998
	Stationäre Anwendungen für häusliche Strom- und Wärmeerzeugung	1999-2000
	Stationäre Anwendungen für dedizierte Strom- (und Wärme-) produktion	2000-2003
	Mobile Anwendungen in Bussen, in Versorgungsfahrzeugen	2000-2003
	Mobile Anwendungen im Schienenverkehr (Stadtbahnen, Lokomotiven)	2005
	Mobile Anwendungen im PKW	2005-2010
PAFC	Stationäre Anwendungen für Strom- (und Wärme-) produktion	1998
	Mobile Anwendungen im Schienenverkehr	1999
MCFC	Stationäre Anwendungen für kombinierte Strom- und Dampfproduktion	2000
	Stationäre Anwendungen im EVU-Einsatz	> 2005
SOFC	Stationäre Anwendungen in der häuslichen Wärme- (und Strom-) produktion	1998
	Stationäre Anwendungen für kommerzielle Wärme- und Stromproduktion	2000-2003
	Stationäre Anwendungen im EVU-Sektor; Mobile Anwendungen im Schienenverkehr	> 2005

Tabelle 4.2: Anwendungsfelder der Brennstoffzellentechnologie[wurster,98]

Nach den allgemeinen Betrachtungen zu Brennstoffzellen wird im folgenden Kapitel gesondert auf die PEM-Brennstoffzelle eingegangen. Der Aufbau, die Eigenschaften und die Anwendungsfelder dieses Zelltyps werden typenspezifisch dargestellt. Die expliziten Ausführungen zur PEMFC untermauern den praktischen Teil dieser Arbeit, in dem ein Brennstoffzellenstack diesen Typ zum Einsatz kommt.

5 PEM-Zelle

5.1 Aufbau der PEM-Zelle

Für die Polymermembranbrennstoffzelle wird i.A. das Akronym PEMFC aus der englischen Abkürzung für „Proton Exchange Membrane Fuel Cell“ benutzt. Die Bezeichnung bezieht sich auf die protonenleitende Polymerfolie die als Elektrolyt verwendet wird.

Das Herzstück der PEMFC ist die sogenannte Membran-Elektroden-Einheit (membrane-electrode-assembly, MEA). Die MEA besteht aus zwei Elektroden und einer dazwischen liegenden Kunststoffmembran als Elektrolyt. Abbildung 5.1 zeigt eine Elektronenmikroskopaufnahme von dem Schnitt durch eine Membran-Elektroden-Schicht und gibt die Größenverhältnisse der Schichten wieder. Die Membran ist 40 µm und die einzelnen Elektroden 5 µm dick.

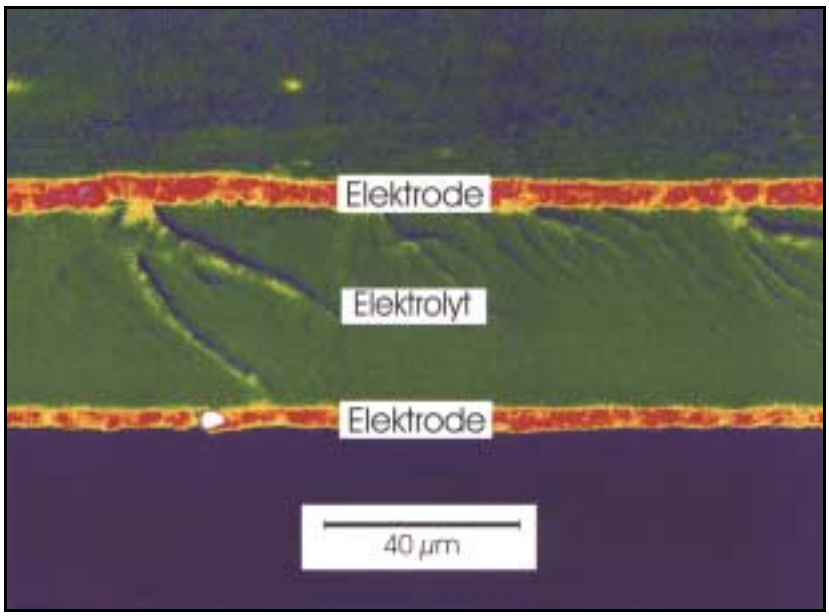

Abbildung 5.1: Schnittbild einer Membran-Elektroden-Schicht [dlr,00]

Die Kunststoffmembran aus einem perfluorierten, sulfonierten Polymer (ein durch Sulfonsäuren modifiziertes Teflonmaterial) verhält sich im angefeuchteten Zustand wie eine „feste“ Säure und leitet Protonen von der Anode zur Kathode. Als Membranmaterial weit verbreitet ist das von DuPont (USA) entwickelte Nafion© oder das etwas leistungsfähigere DOW-Polymer von DOW Chemical (USA). Die Dicke der Membran beträgt zwischen 20 und 100 µm. Im Betriebszustand beträgt der Wassergehalt der Membran 20 - 40 % und die elektrische Leitfähigkeit 0,1 Scm^{-1}.
Die Elektroden bestehen aus porösen Kohlenstoffmatten mit einem eingelagerten Katalysator. Der Katalysator, üblicherweise ein Edelmetall wie Platin oder Ruthenium, beschleunigt die Reaktion und wird auf der Membran zugewandeten Seite in die Elektrode eingebracht. Elektrode und Membran werden heiß verpresst, so dass die Membran in die Elektrode hineinragt. Dadurch bildet sich an den Grenzflächen der Materialien die Drei-Phasen-Reaktionszone aus Gas, Katalysator und Elektrolyt. Der Katalysator hat sowohl Kontakt zum Gas als auch zum Elektrolyten. In diesen katalytischen Zentren laufen die elektrochemischen Prozesse ab [ledjeff,95]. Zur Erhöhung der Konversionsrate ist man bestrebt, möglichst viele und kleine (< 10nm) Katalysatorteilchen auf einer möglichst großen Elektrodenoberfläche zu verteilen, um die wirksame Fläche deutlich zu vergrößern [helio1,99]. Durch die Maximierung der Reaktionsoberfläche konnte die Edelmetallbelegung von 4 mg/cm^2 im

Laufe der Forschungs- und Entwicklungsarbeit inzwischen auf Werte bis zu 0,1 mg/ cm^2 reduziert werden [ledjeff,95]. Abbildung 5.2 veranschaulicht den Aufbau einer Membran-Elektroden-Einheit mit den Reaktionszentren und die dort ablaufenden Prozesse.

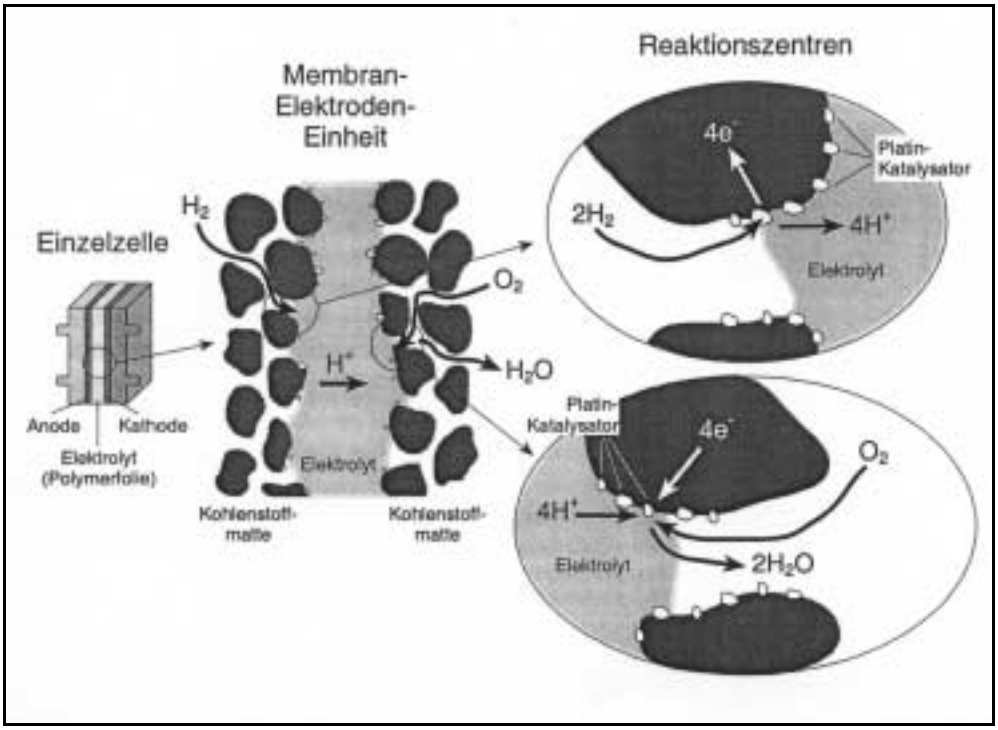

Abbildung 5.2: Schnitt durch eine Membran-Elektroden-Einheit mit den Prozessabläufen [helio1,99]

Um geeignete Leistungen und Spannungen zu erreichen, fasst man die Zellen zu Stapel oder Stacks zusammen. Die Entwicklung von der Einzelzelle zu einem Zellstapel zeigt die Abbildung 5.3.

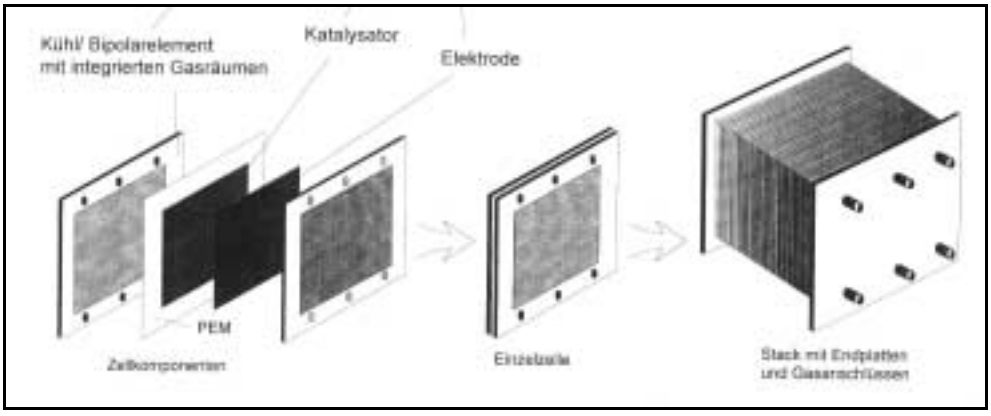

Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau eines Brennstoffzellenstacks [ledjeff,95]

Die Abtrennung der Einzelzellen im Stapel erfolgt durch Bipolarplatten. Dies sind Metallplatten mit eingefrästen oder eingeprägten winzigen Nuten, die wiederum die Gaszufuhr und –abfuhr gewährleisten und zur Befeuchtung der Membran beitragen. Auf der einen Seite der Bipolarplatte wird die Elektrode der einen Zelle und auf der anderen Seite der Platte die Elektrode der benachbarten Zelle aufgebracht. Durch diese Doppelnutzung der Platten können die baulichen Abmessungen eines Zellstapels deutlich reduziert werden.

Die Bipolarplatten haben vielfältige Aufgaben bei Betrieb einer PEM-Brennstoffzelle zu erfüllen, die im folgenden aufgeführt sind [ledjeff,95]:

- Elektrische Kontaktierung der Elektroden
- Weiterleitung des Stromes zu Nachbarzelle bei Serienschaltung
- Versorgung der Zellen mit den Reaktionsgasen
- Abtransport des erzeugten Wassers bzw. Dampfes
- Ableitung der entstehenden Wärme aus der Zelle heraus
- Abdichtung der verschiedenen Gas- und Kühlkammern gegeneinander und nach außen

In Abbildung 5.4 sind die unterschiedlichen Komponenten einer Brennstoffzelle schematisch dargestellt. Die Hauptbestandteile eines Stack mit Membran-Elektrodeneinheit und den Bipolarplatten mit den Gasleitungsnuten sind deutlich wiederzufinden. Weiterhin ist noch ein Kühlkreislauf integriert.

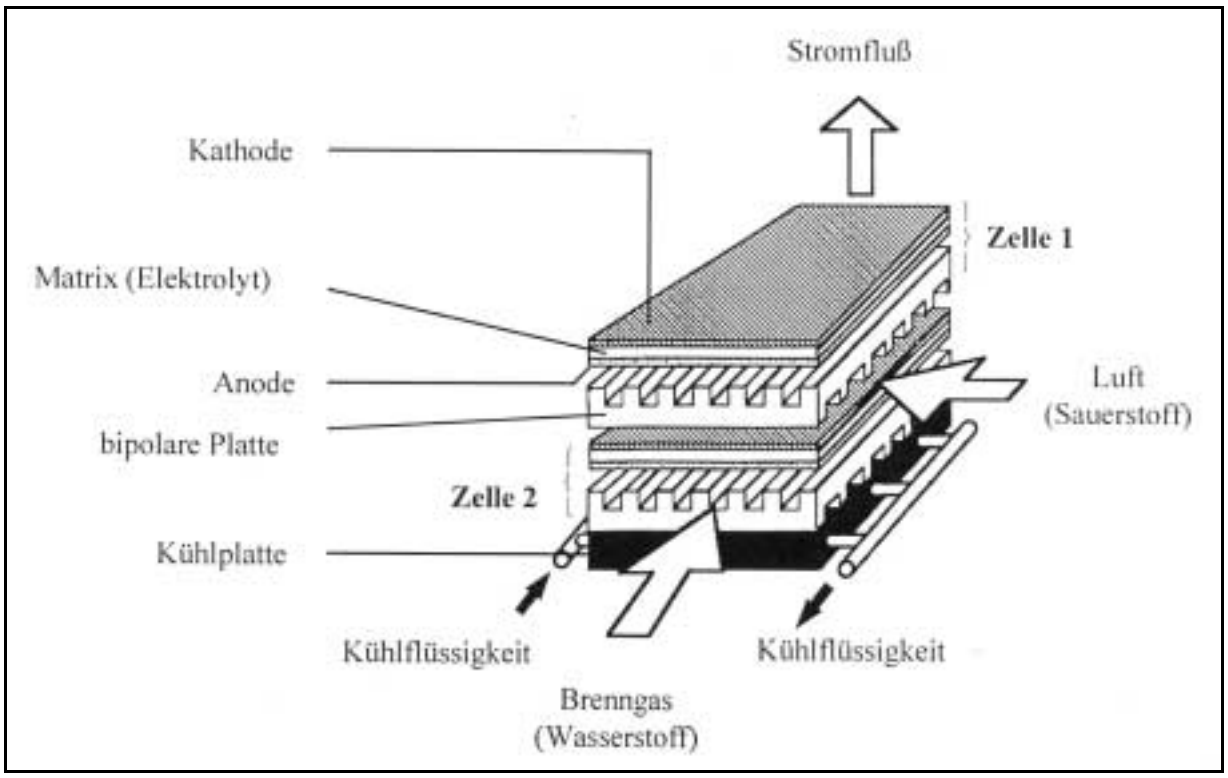

Abbildung 5.4: Aufbau eines Brennstoffzellenstacks [oertle,97]

Abbildung 5.5 zeigt die zwei Bipolarplatten und der Membran-Elektroden-Einheit einer PEM-Brennstoffezelle aus dem Fertigungsprozess.

Abbildung 5.5: Bipolarplatten und MEA einer PEM-Brennstoffzelle [bine,98]

5.2 Betriebsdaten und Eigenschaften

5.2.1 Abmessungen

Je nach Bauprinzip haben die Einzelzellen eine Dicke von 3 bis 5 mm und Außenabmessungen bis zu 400 x 400 mm^2 [ledjeff.95]. Zellstapel können aus mehr als 100 Einzelzellen bestehen [helio1,99].

5.2.2 Betriebstemperatur

Die für die Ionenleitung notwendige permanente Anfeuchtung der Membran begrenzt die Betriebstemperatur einer PEMFC auf 100 °C. Bei Druckbetrieb bis max. 10 bar sind in bestimmten Anwendungsfällen auch höhere Temperaturen möglich [helio1,99]. Die Temperaturbegrenzung hat den Vorteil, dass keine außergewöhnlichen Materialprobleme entstehen. Allerdings liegt das Temperaturniveau der auskoppelbaren Nutzwärme nur im Niedertemperaturbereich von 40 - 70 °C, was den Einsatz der PEMFC in der Kraft-Wärme-Kopplung begrenzt.

5.2.3 Brenngasaufbereitung

Die PEM-Zelle stellt hohe Ansprüche an die Reinheit des Brenngases. Kohlenmonoxid fungiert als Katalysatorgift und wird nur in geringen Mengen, maximal bis 100 ppm, toleriert [nrw,00]. Der maximal zulässige Schwefelgehalt liegt bei kleiner 1 ppm [nrw,00]. Weiterhin sind Stickstoff (N_2), Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) tolerierte inerte Verbindungen im Brenngas. Bei der Verwendung von kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen ist eine Brenngasaufbereitung notwendig, die aus verfahrenstechnischer Sicht problemlos realisierbar ist. Die System-Komponenten haben aber einen zusätzlichen Raumbedarf, verlangen nach weiteren Investitionen und senken letztlich den Systemwirkungsgrad. Eine Weiterentwicklung der PEMFC ist die Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC), die an dieser Stelle aber nicht weiter betrachtet werden soll.

5.2.4 Leistungsdaten

Die Spannung einer Zelle liegt je nach Stromfluss zwischen 0,9 und 0,5 V [helio1,99]. Die Flächenleistung erreicht mit Werten bis zu 1 W/ cm^2 bei einer Stromdichte von 2 A/ cm^2 und der Verwendung von Luft als Oxidant die höchsten Werte aller Zelltypen. Mit reinem Sauerstoff als Oxidant lassen sich die Werte nahezu verdoppeln [ledjeff,95]. Die hohe Leistungsdichte wird insbesondere durch die gute Leitfähigkeit des Elektrolyten erreicht [helio1,99]. Der Leistungsbereich derzeit verfügbarer PEMFC-Anlagen geht von kleinsten Leistungen im Wattbereich bis zu 300 kW. Die guten Kaltstarteigenschaften der PEMFC gegenüber anderen Zelltypen sind von Vorteil. Die Anfahrzeiten sind gering und schon bei Umgebungstemperatur erzeugt die Zelle 50 % ihrer maximalen Leistung [ledjeff,95]. Auch schnellen Lastwechseln kann die PEM-Zelle problemlos folgen, was in kurzen Zeitkonstanten für Sprungantworten auf Lastwechsel resultiert. Der einfache Aufbau der Zelle eröffnet die Möglichkeit einer sehr kompakten Bauform und birgt noch weitere Kostenreduktions-potenziale bei der Serienfertigung.

5.3 Anwendungsbereiche

Der PEMFC erschließt sich durch die beschriebenen Eigenschaften ein breites Anwendungsspektrum. Sowohl in mobilen Anwendungen als auch in der Kraft-Wärme-Kopplung ist ein Einsatz der PEMFC denkbar. Das Leistungsspektrum der Anwendungen erstreckt sich von nur wenigen Watt bis zu ca. 300 kW [nrw,00].

5.3.1 Mobile Anwendungen

Die mobile Anwendung der PEMFC im Fahrzeugbau bietet die vielversprechendsten Perspektiven. Durch die kurzen Anfahrzeiten und die guten Kaltstarteigenschaften ist die PEMFC prädestiniert für eine diskontinuierliche Betriebsweise, wie sie für Fahrzeuge aller Art charakteristisch ist. Die hohe Leistungsdichte dieses Zelltyps unterstreicht die Eignung in diesem Segment. Um eine Alternative zu den konventionellen Verbrennungsmotoren darzustellen, müssen aber auch die Kennzahlen in punkto Leistungsgewicht und Investitionskosten konkurrenzfähig werden. Das Leistungsgewicht einer PEM-Brennstoffzelle beträgt rund 2 kg/ kW, das eines Brennstoffzellen-Systems aus Wasserstoffaufbereitung, Zelle und Elektromotor ca. 4 kg/ kW. Verbrennungsmotoren besitzen hingegen Leistungsgewichte von nur 1 kg/ kW [oertel,97]. Um wirtschaftliche Perspektiven zu schaffen, geht man im mobilen Anwendungsfall von einem maximalen Investitionsvolumen für ein Brennstoffzellen-Antriebsaggregat von 100 DM/ kW aus [vdew,99]. Die weitere Entwicklung der PEM-Zelle im mobilen Anwendungsbereich geht in die Optimierung der beiden genannten Faktoren zur Herstellung der Konkurrenzfähigkeit der neuen Antriebssysteme. Zur Zeit laufen bei fast allen Automobilkonzernen Demonstrationsprojekte im PKW- und im Nutzfahrzeugbereich. Die Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 zeigt das Konzept von Daimler-Chrysler, den Necar 4, auf der Basis der konventionellen Modellreihe der A-Klasse. Zur Zeit ist das Fahrzeug zur Demonstration auf dem Münchner Flughafen im Einsatz.

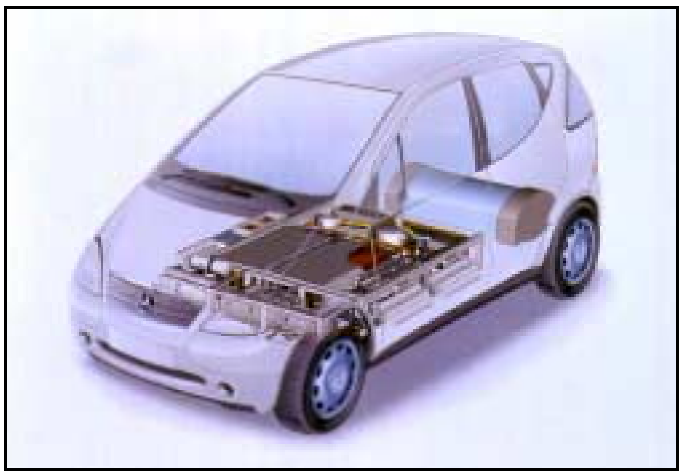

Abbildung 5.6: Konzept des Brennstoffzellen-PKW von Daimler-Chrysler [daimler,00]

Abbildung 5.7: Einsatz des BZ-Fahrzeuges auf dem Münchner Flughafen [daimler,00]

Auch im Bereich der Nutzfahrzeuge sind fortgeschrittene Entwicklungen zu verzeichnen. Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 geben einen Einblick in die Entwicklungen eines Niederflurbusses mit PEMFC-Antrieb.

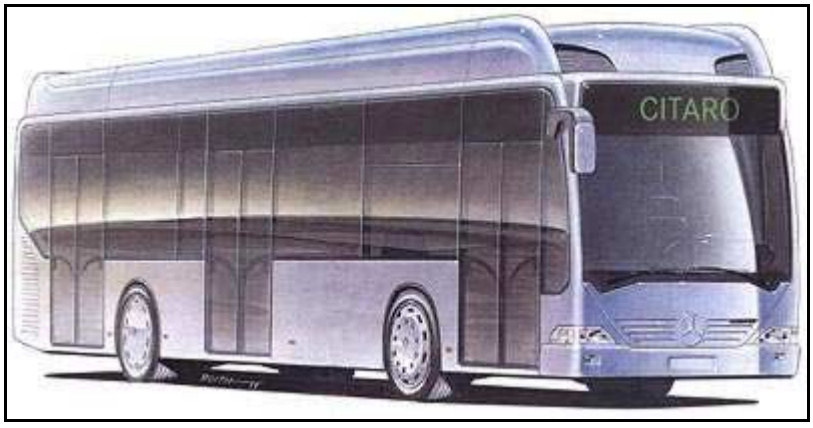

Abbildung 5.8: Designstudie eines Niederflurbusses mit PEMFC-Technologie [daimler,00]

Abbildung 5.9: Produktpalette verfügbarer „no emission“-Nutzfahrzeuge [daimler,00]

5.3.2 Portable Anwendungen

Im Bereich von Kleingeräten von 1 bis 500 Watt ist man bestrebt die Akku- und Batterietechnik durch den Einsatz von kleinen PEM-Zellen mit Wasserstoffspeicher (Metallhydridspeicher) zu substituieren. Die Anwendung konzentriert sich vor allem auf Laptops, Camcorder und Mobiltelefone. In Abbildung 5.10 ist eine portable Energieversorgung eines Laptops zu sehen, welche bei der Frauenhofer Gesellschaft für solaren Energiesysteme (FhG-ISE) als Demonstrationsobjekt erstellt und auf der Hannover Messe 1998 vorgestellt wurde.

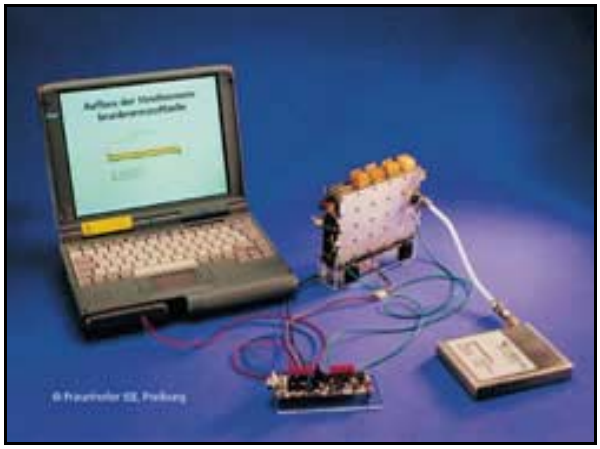

Abbildung 5.10: Portables Brennstoffzellen-System mit einer Leistung von 20 W [fhg,00]

5.3.3 Stationären Anwendungen

In der stationären Anwendung als KWK-Anlage ist der Einsatzbereich der PEMFC aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus begrenzt [vdew,99]. Allerdings bieten sich Anwendungen in der Raumwärmeversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern mit gleichzeitiger Stromproduktion an. In der Studienarbeit „Perspektiven von Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung“ [strup,00] wird dieser Anwendungszweig ausführlich erläutert. Weiterhin sind PEM-Zellen in der Notstromversorgung und als Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) denkbar. Im Leistungsbereich bis 300 kW_{el} haben die Firmen wie Siemens und Ballard Power bereits Pilotanlagen demonstriert. Weiterführende Entwicklungen versuchen die Gleichspannung der Brennstoffzellen direkt für Computer oder Klimaanlagen zu nutzen, um die Umwandlungsverluste durch Wechselrichter zu minimieren. Ob sich der Aufwand einer zusätzlichen Installation eines Gleichspannungsnetzes für bestimmte Versorgungsbereiche etabliert bleibt abzuwarten [oertel,97].

In Abbildung 5.11 wird eine Designstudie einer Hausenergieversorgung vorgestellt, deren Markteinführung für 2001 vorgesehen ist.

Abbildung 5.11: Hausenergieversorgung der Firma Vaillant [vaillant,00]

5.4 Perspektiven und Ausblick

Verschärfte Umweltauflagen, die Deregulierung der Energiemärkte und der Trend zu kleineren, dezentralen Energieerzeugungseinheiten bilden die Rahmenbedingungen für einen zukünftigen Einsatz der Brennstoffzellentechnologie. Für die PEMFC eröffnen sich in diesem Markt sowohl im stationären aber insbesondere im mobilen Anwendungsfall vielversprechende Perspektiven. Im stationären Bereich tritt die PEM-Zelle in Konkurrenz zu konventionellen KWK-Anlagen auf der Basis von Verbrennungsmotoren und Gasturbinen. In der Hausenergieversorgung stellt die PEM - Zelle eine Alternative zu den herkömmlichen Heizkesseln dar. Die Umstrukturierung der Energiemärkte bietet Chancen zur Markteinführung der PEMFC im Wärmemarkt aber auch in der Elektrizitätserzeugung.

<u>Chancen im Wärmemarkt:</u>

In der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser eröffnet sich für die PEM-Zelle im Niedertemperaturwärmemarkt ein großes Einsatzgebiet. Durch steigende Anforderungen im energetischen Bereich bei Neubauten z. B. durch den Niedrigenergiehausstandard sinkt der Bedarf an Wärme zur Beheizung des Hauses und damit auch der Gasbedarf. Bei den hohen Anschlusskosten an das Gasnetz und nur einem reduzierten Gasabsatz verliert die alleinige Bereitstellung von Wärme für die Gasversorger zunehmend an Attraktivität. Brennstoffzellen hingegen produzieren Wärme und Elektrizität und würden zu einer ökonomischen und ökologischen Steigerung des Gasabsatzes führen.

Chancen in der Stromerzeugung:
Brennstoffzellen können für die Energieversorgungsunternehmen (EVU) zu einem neuen Verfahren zur dezentralen Stromerzeugung werden. Ein virtuelles Kraftwerk aus vielen kleineren Brennstoffzelleneinheiten, die durch eine zentrale Leittechnik miteinander verknüpft sind, kann zur Erzeugung von Spitzenlaststrom genutzt werden. Zudem erschließen sich die Energieversorger mit der gleichzeitigen Wärmebereitstellung ein neues, attraktives Feld für Energiedienstleistungen beim Endverbraucher.
Ein großes Problem für die EVU bei der zunehmenden Verbreitung von regenerativen Energieerzeugungsanlagen wie Windkraftanlagen, Photovoltaikmodulen etc. ist die diskontinuierliche Energiebereitstellung dieser Systeme. Das Energieangebot der regenerativen Systeme ist zeitlich und quantitativ schwer prognostizierbar und wird häufig zu Zeiten geringer Energienachfrage bereitgestellt. Die Struktur der heutigen Energieversorgung ist in der Lage diese Fluktuationen abzufedern. Untersuchungen und Berechnungen der Enquetekommission des Deutschen Bundestages im Jahre 1990 ergaben, dass erst ab einem Anteil von $20-25$ % der regenerativen Energien an der Gesamtverstromung ein nennenswerter Bedarf an Wasserstoffkapazitäten als Energiespeicher besteht [ledjeff,95]. In einer zukünftigen, regenerativ geprägten, dezentralen Energiewirtschaft ist der Wasserstoff als Energiespeicher unerlässlich. Die Brennstoffzelle ist in diesem Szenario das ideale Instrument zur Verstromung von Wasserstoff.

Als Folge der Liberalisierung der Energiemärkte und der Dezentralisierung könnte die hohe Qualität des elektrischen Stromes, ähnlich der Entwicklung in den USA, abnehmen. Spannungsschwankungen und häufigere, längere Stromausfälle werden akzeptiert, um den Aufwand und die Kosten der Qualitätssicherung möglichst gering zu halten. Brennstoffzellen können für sensible Verbraucher als Netzersatzanlagen (NEA) oder Unterbrechungsfreie Spannungsversorgungen (USV) und Notstromanlagen fungieren. Nicht zu unterschätzen ist das Segment der netzunabhängigen Energieversorgung für Mobiltelefone und Laptops, die die derzeitige Batterie- oder Akkutechnik ablösen könnte.

Chancen im Mobilitätsmarkt:
Der weitaus größte Markt verbirgt sich aber in der mobilen Anwendung der PEMFC. In der PKW- aber auch in der Nutzfahrzeugproduktion könnte die PEM-Zelle in naher Zukunft ein ernstzunehmendes Konkurrenzprodukt zum Verbrennungsmotor sein. Eine massive Marktdurchdringung geht aber mit einer notwendigen, deutlichen Kostenreduktion einher. Dies ist durch die Weiterentwicklung von kostengünstigen Herstellungsverfahren für Elektroden und Membranstrukturen realisierbar. Die Reduktion des Materialverbrauchs bei der Dotierung der Brennstoffzellen-Elektroden mit Edelmetallkatalysatoren dient als gutes Beispiel für bereits genutzte Kostenreduktionspotenziale in der Herstellungstechnik. Das Hauptaugenmerk der weiteren Entwicklungsarbeit liegt generell in der Umsetzung einfacher und robuster Aufbauten und einer Steigerung der Zellen-Lebensdauer. Speziell für die PEMFC ist Weiterentwicklung der Brenngasaufbereitung, die Verbesserung des Systemwirkungsgrades und die Senkung der Investitionskosten von Interesse.

Kostenentwicklung:
Eine deutliche Senkung der Kosten entsteht durch Serienfertigung der Zellen in hohen Stückzahlen. Abschätzungen erlauben maximale Kosten von 3.000 DM/ kW im stationären Betrieb und 100 DM/ kW im mobilen Einsatz zur Wahrung der Konkurrenzfähigkeit. Diese Werte werden bei Stückzahlen von 100.000 pro Jahr realistisch. Ob aber der Impuls zur Markteinführung aus der Energiewirtschaft oder der Fahrzeugindustrie kommt bleibt abzuwarten.

6 Konzeption zum Aufbau eines Brennstoffzellenmodells

Nachdem die theoretischen Grundlagen zum Energieträger Wasserstoff, zur Wasserstoffwirtschaft und zur Brennstoffzellen-Technologie erarbeitet worden sind, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die durchgeführte Marktanalyse, das Auswahlverfahren und das Konzept für das Experimentiersystem vorgestellt. Die ausgewählten Bausteine, welche dem praktischen Wissenstransfer dienen, werden charakterisiert. Zur Untermauerung der theoretischen Kenntnisse werden praktische Messungen an einem Versuchsstand demonstriert und vorausgehende Bedienungshinweise gegeben.

6.1 Zielsetzung und Anwendungsgebiete

Das Brennstoffzellen-Modell soll im ersten Entwicklungsschritt den Kernbereich einer Wasserstoff-Energiewirtschaft veranschaulichen. Die Anordnung umfasst die Teilsysteme der Energiespeicherung, der Energiewandlung und der Energieanwendung einer vom Wasserstoff geprägten Energiewirtschaft. Der Modellaufbau verfolgt im Wesentlichen zwei Anwendungsfelder:

- Die Brennstoffzellentechnologie soll ein Baustein der Ingenieurausbildung an der Fachhochschule Bielefeld werden. Im Labor für Energiewirtschaft und regenerative Energien wird ein Versuchsstand konzipiert, an dem durch Messungen die Funktionsweise und das Betriebsverhalten von Brennstoffzellen demonstriert werden kann. Weiterhin dient der Versuchsstand zum Technologietransfer in die berufliche Ausbildung, in Schulen und zu interessierten Fachkräften. Die Energiedienstleister als Projektpartner der FH Bielefeld können diesen Transfer als zusätzliche Leistung (Add-on) neben dem Kerngeschäft des Energievertriebs in die Produktpalette aufnehmen. Das Angebot von Schulungen und Seminaren ist ein Instrument der Kundenbindung, welches den Energiedienstleistern aber auch der Fachhochschule von Nutzen sein kann.

- Die einzelnen Bauteile des Versuchsstandes werden in ein Präsentationsmodell implementiert. Dieses dient allen beteiligten Projektpartnern auf Messen, Energietagen, Fachtagungen, Kongressen etc. zur Veranschaulichung neuer Energiekonzepte und nicht zuletzt als Anziehungspunkt (Eye-Catcher) für den Ausstellungsbereich. Das Präsentationsmodell soll modular aufgebaut werden, damit es optimal an die jeweilige Zielgruppe angepasst werden kann.

Die vorliegende Arbeit setzt die ausbildungsorientierte Anwendung des Brennstoffzellen-Modells um. Ein Entwurf zur Umsetzung des Präsentationsmodells und dessen Kommunikation wird am Ende dieser Arbeit vorgestellt. Die Gestaltung des Präsentationsaufbaus und die Kommunikation der Inhalte werden Bestandteil einer Folgearbeit sein.

6.2 Marktanalyse

Eine umfangreiche Marktanalyse auf dem Gebiet der Brennstoffzellen-Technologie ermöglicht eine Einteilung der Hersteller und Lieferanten von Brennstoffzellensystemen in drei Kategorien. Die gewählten Einteilungskriterien sind in dem Anwendungsziel der Anlage als Versuchs- und Präsentationsmodell begründet. Im folgenden werden die drei Kategorien mit ihren charakteristischen Produkten und die Bezugsquellen gekennzeichnet.

Demonstrationsobjekte:
Die angebotenen Modelle dienen vornehmlich zur Demonstration der Theorie der chemischen Wasserspaltung durch Elektrolyse und die anschließende chemische Umwandlung des erzeugten Wasserstoffs in elektrische Energie mittels einer einfachen PEM-Brennstoffzelle. Die Energiezufuhr zur Herstellung des Wasserstoffs im Elektrolyseur kann mit einem Photovoltaik-Modul und externer Beleuchtung oder einem Netzteil vorgenommen werden. Ein kleiner Motor, häufig in der Ausbildung eines Windrades, dient als Verbraucher. Mit der Anordnung kann der geschlossene Energiekreislauf einer solaren Wasserstoffwirtschaft demonstriert werden (vgl. Kapitel 3.8). Anwendung finden diese Systeme hauptsächlich im Physik- oder Chemieunterricht in Schulen. Die Leistungen der PEM-Zellen liegen je nach Modellausführung im Milliwatt-Bereich. An der Brennstoffzelle sowie am Elektrolyseur können Ströme und Spannungen gemessen werden. Die geringe Systemleistung erlaubt aber keine tiefergehenden Untersuchungen oder die Aufnahme von Kennlinien. Die Kosten einer Demonstrationsanlage bewegen sich im Bereich bis 2000 DM.

Hersteller:
- H-TEC Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH, Lübeck, www.h-tec.com
- Heliocentris Energiesysteme GmbH; Berlin, www.heliocentris.com
- WA-TEC Ingenieurbüro Martin Strippel, Darmstadt, www.members.aol.com/strippel/
- Maschinenhandelsgesellschaft Niebur mbH, www.niebur-recklinghausen.de
- PHYWE Systeme GmbH; Göttingen

Versuchsstände:
Für die ingenieurtechnische Ausbildung zukünftiger Energietechniker an technischen Hochschulen und Fachhochschulen bieten 2 Hersteller Versuchsstände an. Diese Anlagen dienen neben der Ausbildung weiterhin als Demonstrationsobjekt zum Einsatz fortschrittlicher Technik und können bei Entwicklungsarbeiten an Brennstoffzellen eingesetzt werden. Die Anlagen sind mit PEM-Brennstoffzellen ausgestattet, die eine elektrische Leistung von 20 bis 500 W (nach Bedarf auch mehr) besitzen. Im Leistungsbereich bis 100 W können an den Versuchständen elektrische Messungen zum Betriebsverhalten der Zelle und des Gesamtsystems vorgenommen werden. Ab einer Leistung von 100 W ist eine Wärmeauskopplung und die Erstellung einer Wärmebilanz möglich. Die Wasserstoffversorgung der Versuchsstände wird durch handelsübliche Gasflaschen gewährleistet. Bei größeren Systemen ist die Luftversorgung der Brennstoffzellen durch einen Verdichter oder ein Druckluftsystem zu sichern. Die überschaubaren Abmessungen lassen eine Anwendung als Präsentationsobjekt durchaus zu. Die Kosten für die Gesamtsysteme belaufen sich je nach Leistung auf 10.000 DM bis 70.000 DM. Es errechnen sich Leistungspreise von 400 bis 150 DM/ W. Kleinere Systeme sind durch den Aufwand der Peripherie vergleichsweise im Leistungspreis teurer.

Hersteller:
Heliocentris Energiesysteme GmbH, Berlin, www.heliocentris.com
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung; Ulm, www.zsw.uni-ulm.de

Brennstoffzellensysteme:
Brennstoffzellensysteme mit einer Leistung größer 1 kW sind im Augenblick nicht kommerziell verfügbar. Ein weiteres Problem dieser Systeme stellt die Wasserstoffversorgung dar. Auf Grund der hohen Leistungen kann diese nicht mehr mit einzelnen Gasflaschen realisiert werden. Entweder müssen die Anlagen mit einem Reformer an das Erdgasnetz angeschlossen werden oder über Gasversorgungseinrichtungen durch Flaschenbündel bzw. Gas-Trailer versorgt werden. Die Energiezufuhr wird technisch aufwendig und grenzt die Mobilität des Systems deutlich ein. Zahlreiche Hersteller entwickeln Systeme, die sich zur

Zeit in der Erprobungsphase befinden. Nur durch technische, wissenschaftliche und finanzielle Mitwirkung an einem dieser Pilotprojekte ist ein derartiges System im Augenblick zu beschaffen. Die Hersteller dieser relativ kleinen Systeme konzentrieren sich auf die Entwicklung von Hausenergiesystemen und werden in der Studienarbeit „Perspektiven von Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung“ [strup,00] näher beleuchtet. Das einzige derzeit kommerziell verfügbare System ist das Brennstoffzellen-BHKW der Firma ONSI, Kanada mit einer Leistung von 250 kW.

6.3 Auswahlkriterien und Kaufentscheidung

Die Zielsetzung ließ nur ein System aus der Kategorie Demonstrationsmodelle oder Versuchstände in Frage kommen. Die Alternative der Eigenkonstruktion wurde aufgrund nicht vorhandener Bezugsquellen der Bauteile aus Serienfertigungen, den hohen Kosten für die Einzelanfertigungen der Bauteile und nicht zuletzt aus mangelnder Erfahrung mit den Systemkomponenten ausgeschlossen. Bei der Auswahl eines geeigneten Systems dienten die folgenden Auswahlkriterien als Entscheidungshilfe:

- Elektrische und thermische Messungen
  Das System soll die Möglichkeit bieten, unterschiedliche elektrische Messungen zur Kennlinienerstellung und Wirkungsgradbestimmung durchzuführen. Darüber hinaus ist eine Wärmeauskopplung zur Erstellung einer Wärmebilanz des Systems vorzusehen.
- Geeignete Leistung zur Präsentation
  Die elektrische Leistung der Brennstoffzelle muss es erlauben, in der Präsentation adäquate Verbraucher anschließen zu können. Die Möglichkeit einer attraktiven Umsetzung des Präsentationsmodells darf nicht durch mangelnde Leistung der Zelle begrenzt werden.
- Brennstoffversorgung
  Die Gasversorgung des Systems soll ohne großen technischen und sicherheitstechnischen Aufwand realisierbar sein. Dazu muss die Transportierbarkeit der Gasversorgung gewährleistet sein. Gleiches gilt auch für die Versorgung der Brennstoffzelle mit dem Oxidanten.
- Leichte Handhabung
  Das System soll nach einer ausreichenden Unterweisung auch für fachferne oder fachfremde Bediener problemlos in Betrieb genommen werden können.
- Robustheit des Systems
  Dem System wird als Experimentiersystem eine gewisse Robustheit abverlangt. Eine mögliche Fehlbedienung soll nicht zu einer unmittelbaren Zerstörung des Systems führen.
- Mobilität
  Zur Präsentation auf Messen etc. wird eine große Mobilität des Systems erwartet. Die Abmessungen werden begrenzt durch die zur Verfügung stehenden kleinen Ausstellungsflächen und die Ladekapazitäten geeigneter Transportfahrzeuge.
- Ausbaufähigkeit
  Ein Entscheidungskriterium ist die problemlose Integration weiterer Teilsysteme einer Wasserstoff-Energiewirtschaft oder die Erweiterung der vorhandenen Teilsysteme um zusätzliche Elemente. In folgenden Entwicklungsschritten ist die Einbindung eines Elektrolyseurs oder einer Photovoltaik-Anlage denkbar.
- Preis
  Der Preis des Systems muss im Verhältnis zur Anwendung und zum Nutzen stehen. Die Finanzierung des Projektes durch die drei Projektpartner sollte beim Projektstart gesichert sein und nicht auf antragpflichtige Zuschussquellen basieren.

Nach Abwägung der Kriterien und Rücksprache mit den Projektpartnern fiel die Entscheidung auf ein Brennstoffzellensystem der Firma Heliocentris Energiesysteme, Berlin. Das Brennstoffzellensystem NP ist erst seit Ende 1999 auf dem Markt und ist in punkto Leistung und Preis zu diesem Zeitpunkt einzigartig am Markt. Es handelt sich um eine unempfindliche PEM-Zelle, die mit Luftsauerstoff als Oxidant betrieben wird. Die Zelle hat eine elektrische Ausgangsleistung von 50 W und wird über eine Druckgasflasche mit Wasserstoff der Reinheit 5.0 versorgt. Durch den modularen Aufbau des System kann es problemlos je nach Anwendungszweck in unterschiedliche Versuchs- oder Präsentationsaufbauten integriert werden. Allerdings lässt sich auf Grund der geringen Leistung und des einfachen Aufbaus keine Wärmebilanz erstellen. Die Kosten liegen im untersten Bereich für Versuchsstände und die Leistungspreis der Zelle liegt trotz der relativ geringen Leistung mit 200 DM/ W im Mittelfeld verfügbarer Systeme. Die Bausteine des Versuchsstandes wurden auf der Didacta, Fachmesse für Lehre und Ausbildung in Köln und auf der Industriemesse in Hannover in Augenschein genommen und für geeignet befunden.

6.4 Konzeptioneller Aufbau

Das Konzept des Brennstoffzellenmodells verfolgt das Ziel, den Kernbereich einer Wasserstoff-Energiewirtschaft zu visualisieren. Grundsätzlich lässt sich die Versuchsanordnung in drei Teilbereiche gliedern:

- Energiespeicherung
- Energieumwandlung
- Energieanwendung

Das Segment der Energiespeicherung besteht aus einer Druckflasche mit Wasserstoff, einem Druckminderer und optional einem Metallhydridspeicher. Die chemische Energieumwandlung findet in einem Brennstoffzellen-Stack statt. Der Bereich der Energieanwendung setzt sich aus mehreren Elementen zusammen. Zur Realisierung eines netzunabhängigen Betriebes kann die Luftversorgung der Zelle über einen Gleichspannungswandler an die Energiewandlungseinheit angeschlossen werden. Zur Durchführung der Messungen wird eine elektronische Last als Verbraucher angeschlossen. Individuelle Verbraucher können direkt oder über einen zusätzlichen Gleichspannungswandler integriert werden. Angedacht sind Verbraucher aus den Nutzenergiebereichen mechanische Energie, Beleuchtung und Kommunikation. Eine detaillierte Auswahl der Verbraucher kann allerdings nur bei der Umgestaltung des Versuchsstandes als Präsentationsmodell erfolgen. Zu den drei Energiebereichen ist eine messtechnische Sektion integriert. Die Aufnahme von elektrischen und thermischen Größen sowie des Wasserstoff-Stromes dienen zur Durchführung der Messungen und zur Überwachung des Systems.

Das Teilsystem ist modular aufgebaut, so dass problemlos einzelne Module entfernt oder gegen andere ausgetauscht werden können. Der schematische Aufbau des Versuchs- bzw. Präsentationsmodells ist in Abbildung 6.1 wiedergegeben. Im folgenden Abschnitt 6.5 werden alle Elemente der Versuchsanordnung näher charakterisiert.

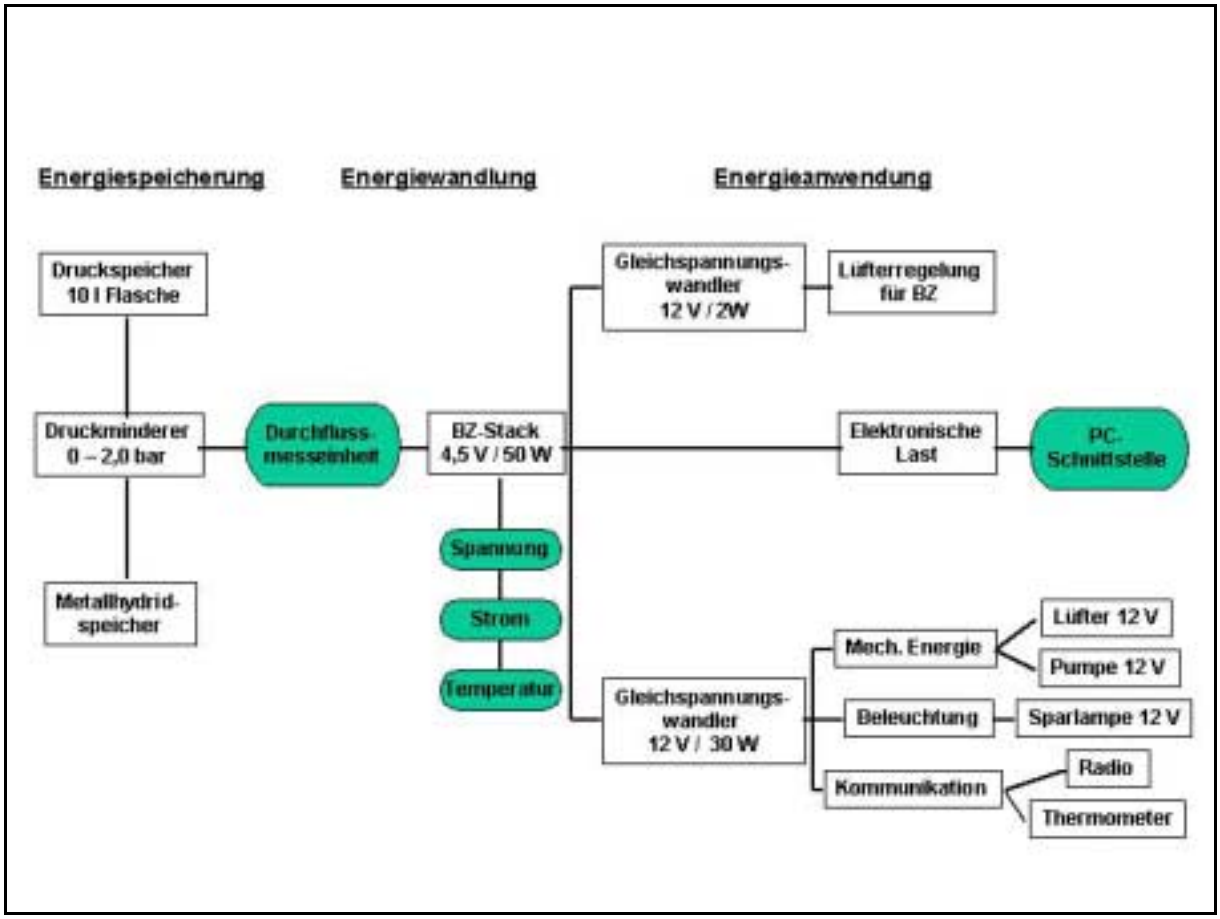

Abbildung 6.1: Konzeption zur Visualisierung des Kernbereiches einer Wasserstoff-Energiewirtschaft

6.5 Beschreibung der Bestandteile des Versuchsstandes

6.5.1 Gasversorgung

Druckspeicher:

Zur Speicherung des benötigten Wasserstoffs kommt eine handelsübliche 10 Liter Druckgasflasche zum Einsatz. Bei einem Fülldruck von 200 bar beträgt der Inhalt der Flasche 1,8 Nm^3 Wasserstoff. Der Außendurchmesser der Flasche beträgt 140 mm bei einer Länge mit Kappe von 970 mm. Das Gesamtgewicht mit Füllung beläuft sich auf 16 kg. Der Druckspeicher wird vom Lieferanten aus dem Bereich Gashandel gemietet und wird bei vollständiger Entleerung gegen eine gefüllte Flasche ausgetauscht.

Kennzeichnung:

Flaschenfarbe	Rot RAL 3002
Prägung	Wasserstoff
Aufkleber	Angabe der Produktbezeichnung z.B. Wasserstoff 5.0
Kennstreifen	Banderole um die Flaschenkappe

Druckminderer:
Um den Flaschendruck von 200 bar auf den maximal zulässigen Arbeitsdruck der Versuchsanordnung von 1 bar zu reduzieren ist ein Druckminderer an der Wasserstoffflasche notwendig. Der Druckminderer FMD 302-14 der Firma Linde entspricht den gestellten Anforderungen. Abbildung 6.2 zeigt den ausgewählten Modelltyp.

Abbildung 6.2: Druckminderer FMD-302-14 der Firma Linde [linde2,00]

Die typischen Anwendungsbereiche des Druckminderers FMD 302 erstrecken sich von der Analysentechnik bis zu allgemeinen Laboranwendungen. Der Membrandruckminderer mit einem Hinterdruckbereich von 0 – 2 bar ist für nicht korrosive Gase bis Reinheit 5.0 zugelassen. Die zweistufige Ausführung gewährleistet einen konstanten Hinterdruck unabhängig vom Flaschendruck (Vordruckabfall bei zunehmender Flaschenleerung). Die dynamische Entspannungskurve in Abbildung 6.3 verdeutlicht den konstanten Hinterdruck über den nahezu gesamten Vordruckbereich. Die Ausführung mit Regelventil erlaubt eine feine Dosierung des Gasstromes. Der maximale Durchfluss der Druckentnahmeeinrichtung liegt bei 5 Nm^3/h (Abbildung 6.4). Bei den geringen Durchflussmengen der Versuchsanordnung im Bereich von max. 0,06 m^3/h wird dieser Endbereich bei weitem nicht erreicht. Der Hinterdruckanschluss besteht aus einer Klemmringverschraubung für einen Rohr-Außendurchmesser von 1/8 Zoll.

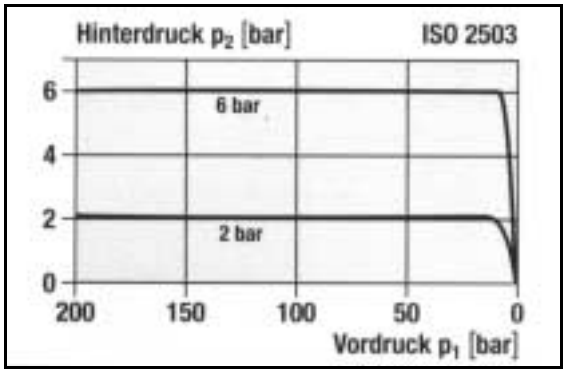

Abbildung 6.3: Dynamische Entspannungskurve [linde2,00]

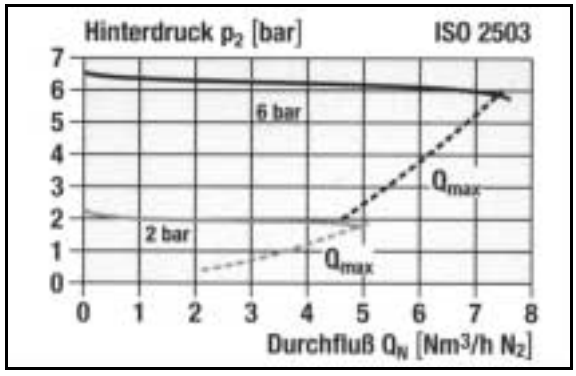

Abbildung 6.4: Leistungskurve des Druckminders [linde2,00]

Technische Daten:

Nenndruck	200 bar
Hinterdruckbereich	0,1 – 2 bar
Gasreinheit	≤ 5.0
Leckrate	≤ 10^{-7}/ 10^{-6} mbar l/s He nach außen
Werkstoff Gehäuse	Messing vernickelt und verchromt integrierter Partikelfilter
Werkstoff Membran	Hastelloy C
Werkstoff Sitzdichtung	PCTFE
Manometer	Sicherheitsausführung nach EN 562, Messklasse 2,5 Nenngröße 50 mm Anzeigebereich 0 – 315/ 0 – 3 bar
Betriebstemperatur	-20 – 70 °C

6.5.2 Energiewandlung

Brennstoffzellen-Stack

Zur chemischen Energiewandlung werden PEM-Brennstoffzellen eingesetzt. Aus 10 Einzelzellen wurde ein Stack NP 50 mit einer Nennleistung von 50 W zusammengestellt. Die Stackspannung beträgt bei Nennleistung rund 4,5 V. Das System arbeitet in einem Wasserstoff-Luftbetrieb. Als Brenngas wird Wasserstoff der Reinheit 4.0 gefordert und die Reinheitsstufe 5.0 empfohlen. Als Oxidant wird Luftsauerstoff eingesetzt, der über zwei Lüfter an den Brennstoffzellen zugeführt wird. Um unverbrauchten Wasserstoff und inerte Gasverbindungen aus dem System zu entlassen, ist am Stack ein Spülventil angebracht, welches in regelmäßigen Abständen geöffnet werden muss [helio,2,99].

Technische Daten:

Elektrische Nennleistung	50 W
Maximale Leistung	60 W
Leerlaufspannung	9,2 V
Strom bei Nennleistung	ca. 10 A
Spannung bei Nennleistung	4,5 V
Maximaler Strom	15 A
Wasserstoffverbrauch bei Nennleistung	ca. 725 Nml/ min
maximaler Betriebsdruck	2 bar_{abs}
Zulässige Umgebungstemperaturen	15 – 30 °C

Abmessungen:

Stack ohne Lüfter (BxHxT)	138 x 80 x 90 mm
Höhe mit Lüfter	150 mm

In Abbildung 6.5 ist der Brennstoffzellen-Stack NP 50 mit den 2 Lüftern und dem Spülventil zu sehen. Die elektrische Leistung wird über 2 Klemmen an den Seiten des Stacks abgegriffen.

Abbildung 6.5: Brennstoffzellenstack NP 50 der Firma Helicentris

Lüfterregelung

Mit der Leistungsregeleinheit FP 50 (Abbildung 6.6) werden die Lüfter am Brennstoffzellen-Stack betrieben. Die Lüfterregelung kann extern über ein Netzteil oder mit einem Gleichspannungswandler (DC 20) aus dem System mit einer Spannung von 9-12 V DC versorgt werden. Über ein Potentiometer kann die Lüfterspannung und somit auch die Drehzahl der Lüfter stufenlos geregelt werden. Die jeweils anliegende Lüfterspannung wird in einem Display angezeigt. Über eine 0 – 5 V-Schnittstelle kann die Steuerung der Lüfter auch extern z.B. über einen PC erfolgen.

Abbildung 6.6: Lüfterregelung FP 50 der Firma Helicentris

Elektronische Last

Mit Hilfe der elektronischen Last ELP 100 kann das Brennstoffzellen-System mit konstanten Lasten beaufschlagt werden. Dabei kann entweder ein konstanter Laststrom (Betriebsart Stromkonstant) oder ein konstanter Lastwiderstand (Betriebsart Widerstandkonstant) eingeregelt werden. Bei der Durchführung der Messungen wird die Anwendung der elektronischen Last empfohlen, um konstante Lastzustände einstellen zu können. Ein permanentes Nachregeln des Stromes entfällt bei Verwendung der elektronischen Last. Über eine 0 – 5 V-Schnittstelle kann die elektronische Last auch ferngesteuert geregelt werden [euro,00]. Abbildung 6.7 zeigt die elektronische Last mit einer digitalen Spannungs- und Stromanzeige.

Abbildung 6.7: Elektronische Last der Firma ET System electronics

Gleichspannungswandler

Die Gleichspannungswandler DC 2 und DC 50 (Abbildung 6.8) arbeiten als Gleichstromsteller und setzen die Gleichspannung aus dem Brennstoffzellen-Stack herauf. Bei dem DC 2 ist die Ausgangsspannung auf 12 V festgelegt. Bei dem DC 50 können Ausgangsspannungen von 6 V, 9 V und 12 V über einen Drehschalter gewählt werden. Beide Gleichspannungswandler können zur Versorgung der Lüfterregelung eingesetzt werden. Weiterhin ist ein individueller Betrieb, je nach geforderten Spannungsniveau, verschiedenster Verbraucher mit diesen Elementen möglich.

Technische Daten:

	DC 2	DC 50
Eingangsspannung	2 – 4 V	2 – 10 V
Ausgangsspannung	12 V	6/ 9/ 12 V
Max. Leistung	2 W	100 W

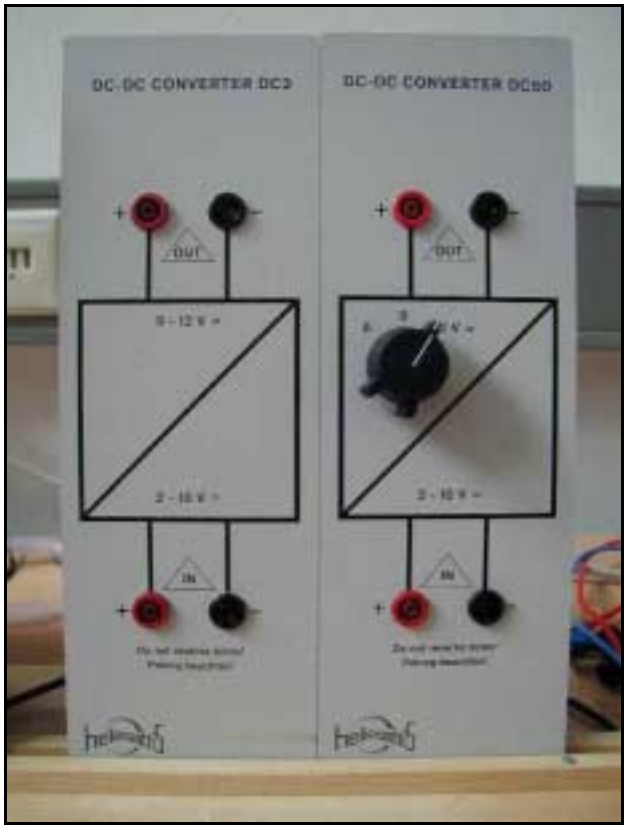

Abbildung 6.8: Gleichspannungswandler DC 2 und DC 50 der Firma Heliocentris

Erweiterung Innenwiderstand:
Zur Durchführung der Messung 8.4 wird als Erweiterung des Innenwiderstands der Brennstoffzelle ein Lastwiderstand mit 0,05 Ω und 25 W Verlustleistung benötigt. Im Handel ist kein Widerstand mit den geforderten Werten erhältlich. Aus diesem Grund wurde das Bauteil durch eine Parallelschaltung zweier Widerstände mit 0,1 Ω und 50 W realisiert.

6.5.3 Messeinrichtungen

Gasversorungs- und Messeinheit
Um den Wasserstoffdurchfluss bestimmen zu können, ist in die Anordnung die Gasversorgungs- und Messeinheit HC 50 (Abbildung 6.9) integriert worden. Das wesentliche Bauteil dieser Messeinrichtung ist ein Schwebekörper-Durchflussmesser. In einem konischen Rohr wird eine Kugel durch den Gasstrom gegen die Schwerkraft nach oben gedrückt. Mit Hilfe eines Durchfluss-Diagramms (im Anhang Abbildung 12.5) kann unter Hinzuziehung des Systemdrucks die Position der Kugel in einem Wasserstoff-Volumenstrom umgerechnet werden. Um die Ablesegenauigkeit zu erhöhen sind im Glasrohr zwei Kugeln enthalten. Eine schwarze Glaskugel zur Bestimmung kleiner Durchflussmengen und eine metallisch glänzende Stahlkugel für größere Durchflüsse. Die Bestimmung des Wasserstoff-Volumenstroms ist stark vom Systemdruck abhängig. Aus diesem Grund ist die Verwendung eines hochwertigen Druckminderers mit kleiner Manometerteilung und die genaue Justierung des Betriebsdrucks für die Genauigkeit der Durchflussmenge ausschlaggebend. An der Eingangsverschraubung der Gasversorgungs- und Messeinheit ist ein Sicherheitsventil angebracht, welches bei Überschreitung des maximalen Betriebsdrucks von 2 bar_{abs} den überschüssigen Wasserstoff ablässt [helio,00].

Technische Daten:

vorgesehene Gasart	trockener Wasserstoff
Messbereich der schwarzen Glaskugel	350 Nml/ min bei 2 bar
Messbereich der metallischen Stahlkugel	900 Nml/ min bei 2 bar
Messgenauigkeit	2 % vom Maximalwert
Temperaturbereich für den Betrieb	15 – 30 °C

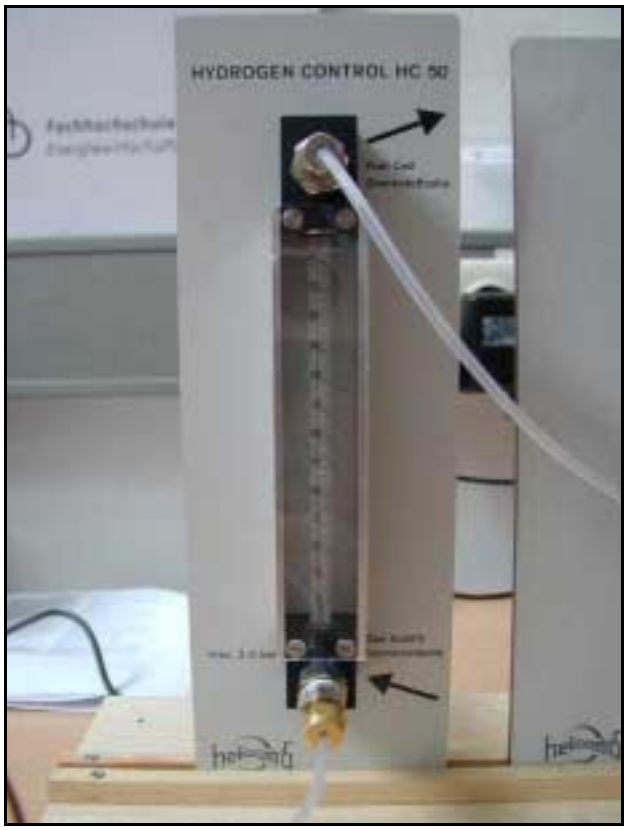

Abbildung 6.9: Gasversorgungs- und Messeinheit HC 50 der Firma Heliocentris

Messung elektrischer Größen

Um die elektrischen Parameter Spannung und Strom zu messen, können handelsübliche Digitalmulimeter eingesetzt werden. Der Spannungsmessbereich sollte für Gleichspannungen bis 15 V und der Strommessbereich für Gleichströme bis 12 A zugelassen sein.

Temperatur

Um die Temperatur des Stacks zu bestimmen wird ein handelübliches digitales Temperaturmessgerät mit einem Messbereich bis mindestens 50 °C eingesetzt . Der Temperatursensor wird in die dafür vorgesehene Durchgangsbohrung am Brennstoffzellen-Stack eingeführt.

7 Grundlegende Bedienungshinweise

An dem Brennstoffzellensystem dürfen nur Personen arbeiten, die die Bedienungsanleitungen der einzelnen Bauteile [helio,2,99], [helio,00], [euro,00] und die Experimentieranleitung [helio1,99] vollständig und genau gelesen haben und beachten. Weiterhin sollten die Bediener auf Grund ihrer Ausbildung über die notwendigen Kenntnisse und Fähigkeiten verfügen, um die Anlage sicher betreiben zu können oder durch geeignete Personen in den Betrieb der Anlage eingewiesen und über die ausgehenden Gefahren informiert worden sein. Die Anlage darf nur in Räumen betrieben werden, in denen durch geeignete Maßnahmen zündfähige Gas-Luft-Gemische nicht zustande kommen können. Die gültigen Sicherheitsvorschriften für alle Elemente des Brennstoffzellensystem sind zu beachten.

7.1 Aufbau und Handhabung des Brennstoffzellenmodells

7.1.1 Montage des Wasserstoff-Gassystems

Herstellung des Systemdrucks:
Bei der Wasserstoff-Versorgung des Systems muss der maximale Betriebsdruck des Systems von 2 bar_{abs} unbedingt durch geeignete Maßnahmen eingehalten werden. In dem realisierten Versuchsaufbau wird dies durch einen entsprechenden Druckminderer (vgl. Kapitel 6.5.1) an der Wasserstoff-Flasche erreicht. Zusätzlich befindet sich an der Durchfluss-Messeinheit ein Sicherheitsventil, welches sich bei zu großen Drücken öffnet. Die am Ausgang des Sicherheitsventils eventuell austretenden Wasserstoffmengen sind über einen gasdichten Schlauch mit einem Abzug zu verbinden oder ins Freie zu leiten.

Montage der Gasleitungen:
Die Verbindungen für die Gasversorgung werden mit einem speziellen gasdichten Schlauch mit einem Außendurchmesser von 1/8 Zoll ausgeführt. Der Anschluss an die entsprechenden Bauteile erfolgt über Klemmringverschraubungen. Die Montage der Verschraubungen ist wie folgt durchzuführen:

1. Die Vollständigkeit und die richtige Anordnung der Dichtelemente ist nach Abbildung 7.1 zu prüfen.
2. Den Schlauch bis zum Anschlag in die Verschraubung einschieben.
3. Die Überwurfmutter handfest anziehen.
4. Mit einem passenden Schlüssel wird die Überwurfmutter genau 1 ¼ Umdrehungen angezogen. Der Sechskant am unteren Teil der Verschraubung wird mit einem geeigneten Schlüssel gegen Verdrehen gesichert.
5. Nach Abschluss der Montagearbeiten wird der Systemdruck eingestellt. Alle Verschraubungen müssen mit einem speziellen Leckagen-Such-Spray auf eventuelle Undichtigkeiten untersucht werden.

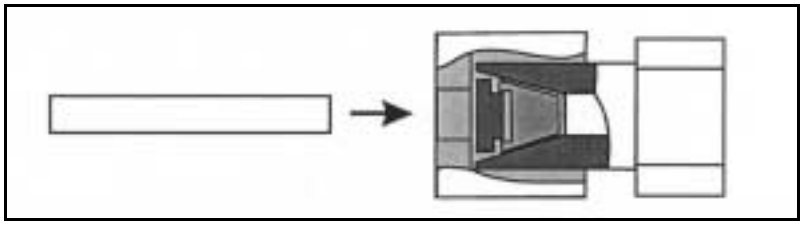

Abbildung 7.1: Aufbau einer Klemmringverschraubung [helio2,99]

7.1.2 Handhabung der Zelle

Beim Betrieb des Brennstoffzellen-Stacks müssen die folgenden Sicherheits- und Bedienungshinweise beachtet werden:

- Der maximale Betriebsdruck des Stacks von 1 bar Überdruck (Anzeige des Manometers am Druckminderer) oder 2 bar_{abs} darf in keinem Fall überschritten werden. Geeignete Sicherungssysteme sind vorzusehen.
- Plötzliche Druckstöße sind zu vermeiden. Die Membran ist empfindlich gegen zu hohe Drücke. Der Wasserstoff-Druck sollte langsam auf den maximal zulässigen Wert erhöht werden.
- Die Montagebolzen des Stacks dürfen nicht gelöst werden. Dies könnte zu Undichtigkeiten der Brennstoffzelleneinheit führen.
- Der Stack, vor allem der Katalysator und die Membran, ist empfindlich gegen Staub und einer Reihe von chemischen Verunreinigungen wie Schwefelverbindungen, Kohlenmonoxid, Ammoniak, Chlorverbindungen und verschiedenste Lösemittel. Der Stack sollte nicht an Orten betrieben und gelagert werden, an denen er mit diesen Stoffen in Berührung kommen könnte. Bei längeren Stillstandszeiten ist eine Lagerung im Originalkarton empfehlenswert.
- Die Brennstoffzellen erwärmen sich während des Betriebes. Die Stack-Temperatur sollte mit einem Thermometer überwacht werden. Die Lüftersteuerung soll so eingeregelt werden, dass eine Stack-Temperatur von 45 °C nicht überschritten wird.
- Die Einzelzellen des Stacks sind nach außen elektrisch nicht isoliert. Zwischen den Zellen liegt eine Spannung an. Die Zellen sind in der Lage kurzfristig sehr große Ströme zu erzeugen. Ein ungewollter Kurzschluss zwischen den Kohlenstoffplatten, z.B. durch elektrisch leitende Werkzeuge, ist unbedingt zu vermeiden.
- Die Versorgung der Brennstoffzellen mit ausreichenden Mengen Wasserstoff bei gleichzeitiger Stromentnahme muss immer gewährleistet sein, um die Zerstörung der Katalysatoren und der Membran zu verhindern.
- Bei einem Abfall der Stackspannung unter 4,0 Volt muss die Last unverzüglich von Stack getrennt werden. Eine Überwachung der Stackspannung während des Betriebes ist vorzusehen.
- Während des Betriebes soll auch die Spannung der Einzelzellen überprüft werden. Fällt eine der Einzelspannungen unter 0,4 V ist unverzüglich die Last zu reduzieren.
- Bricht bei der Dead-end-Betriebsweise die Spannung der letzten Zelle in Strömungsrichtung zusammen, müssen die Inertgase mit dem Spülventil aus dem Stack geblasen werden.
- Die Beaufschlagung der Zellen mit externen Strömen zur Prozessumkehrung führt zur einer Zerstörung der Bauteile.

7.1.3 Betriebsweisen der Gasversorgung

Die Versorgung der Brennstoffzellen mit Wasserstoff kann mit zwei Betriebsweisen gesichert werden:

<u>Durchfluss-Betrieb:</u>
Beim Durchfluss-Betrieb werden die Brennstoffzellen drucklos mit Wasserstoff versorgt. Der Wasserstoff durchströmt die einzelnen Brennstoffzellen in Strömungsrichtung und nicht verbrauchter Wasserstoff tritt an der Ausgangs-Rohrverschraubung wieder aus. Zur genauen Justierung der Wasserstoffmenge muss am Gasausgang des Stacks ein Blasenzähler angeordnet werden. Blasenzähler bestehen aus zwei gegeneinander geschalteten Gaswaschflaschen, von der die zweite mit destilliertem Wasser gefüllt ist. Die Anordnung des

Blasenzählers im Brennstoffzellen-System wird aus Abbildung 7.2 deutlich. Der Durchfluss ist so einzustellen, dass im Blasenzähler ca. eine Wasserstoff-Blase pro Sekunde austritt.

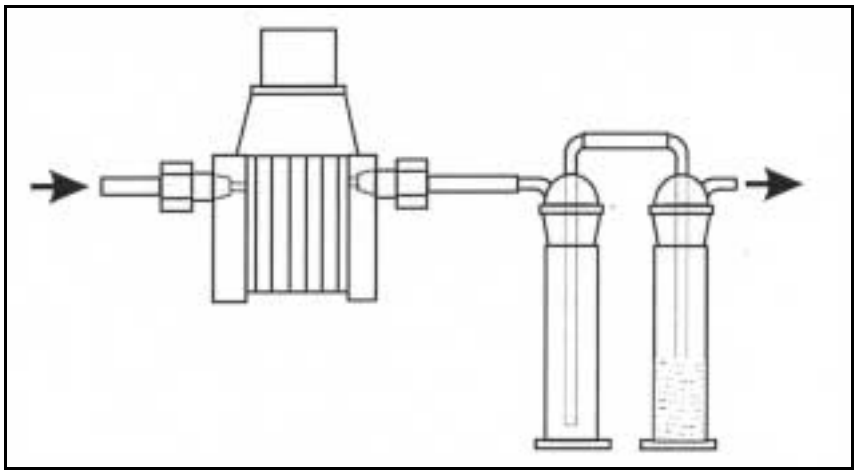

Abbildung 7.2: Anordnung des Blasenzählers im Durchfluss-Betrieb [helio2,99]

Beim Durchflussbetrieb ist eine permanente Überwachung des Systems notwendig. Eine Variierung des Stromes wirkt sich unmittelbar auf den Wasserstoff-Verbrauch aus. Schon geringe Änderungen im Wasserstoff-Fluss können zum Austritt größerer Mengen Wasserstoff oder auch zur Unterversorgung des Stacks führen. Eine unverzügliche Anpassung des Wasserstoff-Flusses an den veränderten Strom ist zwingend notwendig.

Der Durchflussbetrieb wird für einfache Demonstrationsexperimente empfohlen, da zusätzliche Installationen für den Druckbetrieb nicht notwendig sind. Werden die Brennstoffzellen direkt mit einem Elektrolyseur ohne Zwischenspeicher und Sicherheitsüberwachung versorgt, ist ebenfalls diese Betriebsart zu wählen.

Dead-end-Betrieb:
Beim Dead-end-Betrieb wird die Ausgangsseite des Brennstoffzellenstacks mit einem Spülventil verschlossen. In die Zellen strömt nur die Wasserstoffmenge, die die Zelle im Betrieb unmittelbar verbraucht. Bei der Montage des Spülventils ist die, durch einen Pfeil am Ventil gekennzeichnete, Durchflussrichtung zu beachten. Im Dead-end-Betrieb muss vor dem Stack ein Überdruckventil angebracht sein, welches bei Versagen der Druckeinstellung des Druckminderers zu große Systemdrücke verhindert. Bei der Integration der Gasversorgungs- und Messeinheit in den Versuchsaufbau erfüllt das Sicherheitsventil an diesem Element diese Funktion. In Abbildung 7.3 wird die Anordnung des Spülventils und des Sicherheitsventils der Gasversorgungs- und Messeinheit im Dead-end-Betrieb gezeigt.

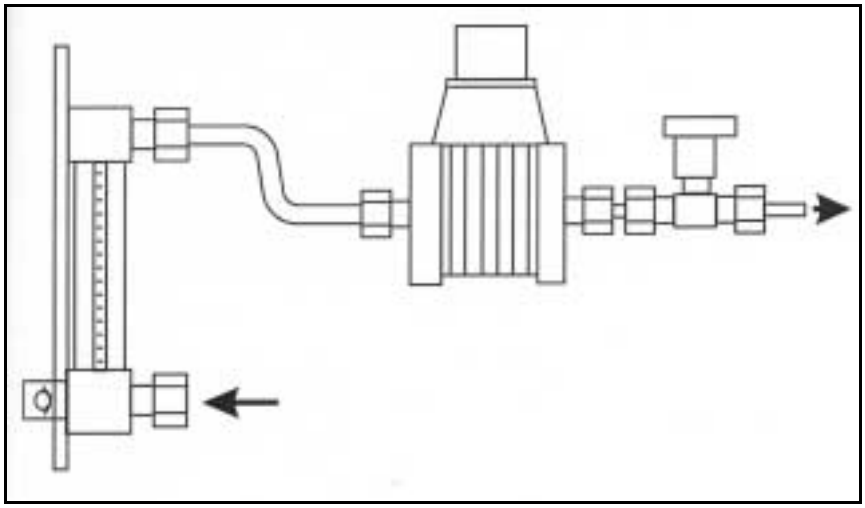

Abbildung 7.3: Anordnung im Dead-end-Betrieb [helio2,99]

Während des Betriebes sammeln sich in der letzten Brennstoffzelle unverbrauchter Wasserstoff und inerte Gase an. Die Anlagerung beeinträchtigt die Arbeitsweise der letzten Zelle, was sich im Absinken der Spannung dieser Zelle bemerkbar macht. Durch Öffnen des Spülventils am Brennstoffzellen-Stack können diese Gase ausgespült werden. Die notwendigen Zeitabstände zwischen den Spülvorgängen hängen von der Reinheit des Wasserstoffs, der Betriebsweise und der Belastung der Zelle ab.

Für die in dieser Arbeit vorgestellten Messungen an dem Brennstoffzellensystem wird der Dead-end-Betriebs empfohlen. Auch wenn der Durchflussmesser nicht bei der Datenaufnahme jeder Messung notwendig ist, bietet das Sicherheitsventil an diesem Element einen zusätzlichen Schutz der Bauteile gegen zu hohe Betriebsdrücke.

Empfehlungen bei der Durchführung von Messungen im Dead-end-Betrieb:

Bei Stromstärken unter 2 A sollte das Ventil im Abstand von maximal 10 Minuten für ca. 1 Sekunde geöffnet werden. Bei Strömen oberhalb von 2 A empfiehlt es sich, nach der Aufnahme jedes Datenpunktes für ca. 1 Sekunde das Spülventil zu öffnen.

Der Druck im System ändert sich geringfügig, wenn sich der Wasserstoffverbrauch im Stack verändert. Sie sollten daher nach Einstellen neuer Lastzustände den Systemdruck am Manometer des Druckminderers kontrollieren und gegebenenfalls etwas korrigieren.

7.2 Inbetriebnahme

7.2.1 Kurzcheck der Zelle

Bevor das Brennstoffzellensystem in Betrieb genommen werden kann, müssen die Membranen der Zellen auf Dichtigkeit geprüft werden. Defekte Membranen können zur Bildung zündfähiger Wasserstoff-Luft-Gemische führen und stellen eine Gefahr dar. Das Prüfkriterium ist die Leerlaufspannung des Brennstoffzellenstacks. Eine undichte Membran führt zu einem Überströmen von Wasserstoff auf die Luftseite und zu einer deutlichen Reduzierung der Leerlaufspannung der Zelle. Mit der Durchführung der Prüfschritte im folgenden Ablaufdiagramm (Abbildung 7.4) soll die Betriebsbereitschaft der Brennstoffzelle vor jeder Inbetriebnahme sichergestellt werden.

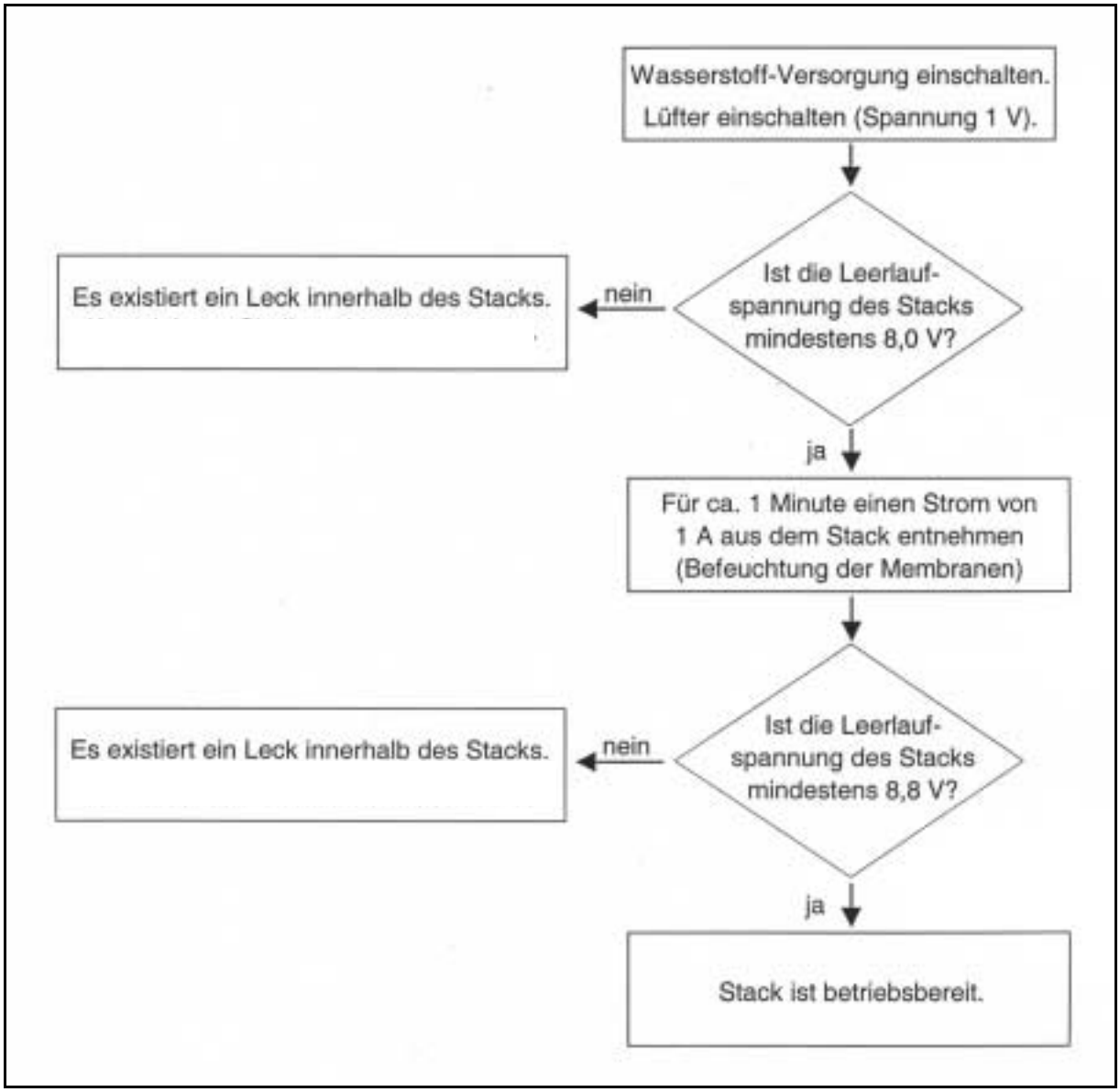
Wasserstoff-Versorgung einschalten.
Lüfter einschalten (Spannung 1 V).
Ist die Leerlauf-spannung des Stacks mindestens 8,0 V?
nein
Es existiert ein Leck innerhalb des Stacks.
ja
Für ca. 1 Minute einen Strom von 1 A aus dem Stack entnehmen (Befeuchtung der Membranen)
Ist die Leerlauf-spannung des Stacks mindestens 8,8 V?
nein
Es existiert ein Leck innerhalb des Stacks.
ja
Stack ist betriebsbereit.

Abbildung 7.4: Kurzcheck des Brennstoffzellenstacks NP 50 [helio1,99]

7.2.2 Anfahren der Anordnung

Zur Durchführung der Messungen muss sich der Brennstoffzellenstack in einem leistungsbereiten Zustand befinden, was eine ausreichende Befeuchtung der Membranelektrolyten der Zellen erfordert. Schon nach einer Betriebspause von einem Tag ist dies nicht mehr gewährleistet. Durch eine Einlaufphase von 10 bis 15 Minuten bei kleiner Leistung ist von einer ausreichenden Befeuchtung der Membran auszugehen.

Sollte das System vorher nicht in Betrieb gewesen sein, ist das Anfahren des Versuchs unter Durchführung der folgenden Schritte durchzuführen. Ist das System unmittelbar zuvor schon betrieben worden, können Sie direkt mit der Versuchsdurchführung beginnen:

1. Öffnung des Spülventils am Stack (gilt nur bei Dead-end-Betrieb)
2. Vorsichtige Öffnung der Wasserstoffversorgung, um das System für einige Sekunden zu spülen. Plötzliche Druckstöße sind dabei zu vermeiden. Der Wasserstoff-Druck sollte langsam erhöht werden und darf einen Wert von 2,0 bar_{abs} (1,0 bar Überdruck) nicht überschreiten.
3. Das Spülventil des Stacks kann wieder geschlossen werden (gilt nur bei Dead-end-Betrieb).
4. Entsprechend der Anleitung ist der Kurzcheck für die Zelle (vgl. Kapitel 7.2.1) durchzuführen.
5. Nach erfolgreichem Kurzcheck kann das System warmgefahren werden. Dazu ist ein Arbeitspunkt bei einem Strom von rund 1 A und einer Lüfterspannung von 1 V auszuwählen. Der gewünschte Systemdruck beim Dead-end-Betrieb (0,2 bis 1,0 bar Überdruck) bzw. der erforderliche Wasserstoff-Durchfluss beim Durchflussbetrieb ist einzustellen. Beim Durchflussbetrieb ist der Wasserstoff-Fluss so zu justieren, dass im Blasenzähler ca. eine Wasserstoffblase pro Sekunde austritt.

$\Rightarrow$ Mit der Versuchsdurchführung kann begonnen werden, wenn
- die Temperatur des Stacks nicht höher als 30 °C und
- die Leerlaufspannung mindestens 8,8 V beträgt und
- die schwarze Glaskugel im Strömungsmesser ruhig schwebt

7.3 Hinweise zur Außerbetriebnahme

Zur Einstellung des Betriebes des Brennstoffzellenstacks sind die folgenden Schritte vom Bediener durchzuführen:

1. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle.
2. Schließen Sie die Wasserstoffversorgung durch Betätigen der Ventile.
3. Schalten Sie die Lüftersteuerung aus.
4. Vergewissern Sie sich, dass die Wasserstoffversorgung geschlossen ist.

8 Beschreibung der Messungen

In diesem Abschnitt der Arbeit werden neun unterschiedliche praktische Messungen an dem Brennstoffzellensystem vorgestellt. Die Darstellung der Messaufgaben strukturiert sich in folgende Gliederungspunkte:

- Versuchsziel
  In einer kurzen Zusammenfassung wird dem Anwender das Ziel des entsprechenden Versuchs vorgestellt. Es erleichtert die Orientierung und dient zum besseren Verständnis der Versuchsreihe.
- Versuchsdurchführung
  In der Versuchsdurchführung werden Anleitungen und Hinweise zum Aufbau und zur Durchführung der jeweiligen Messung gegeben. Die in der Versuchsdurchführung angegebenen Werte der einzustellenden Betriebsgrößen sind nicht verbindlich und können variiert werden. Die vorgegebenen Werte verstehen sich als Beispielgrößen, bei denen die Messung problemlos reproduzierbar ist. Nach eingehender Einarbeitung in das Gesamtsystem ist eine Abweichung von den Beispielwerten durchaus sinnvoll. Bei der Durchführung der Versuche und der Variation der Parameter müssen die Hinweise und Sicherheitsvorschriften in Kapitel 7 „Grundlegende Bedienungshinweise“ unbedingt beachtet werden.
- Messwerttabelle
  Die Messungen sind beispielhaft für einen ausgewählten Betriebszustand des Brennstoffzellensystems durchgeführt worden. Die jeweils eingestellten Parameter und die Messergebnisse sind in tabellarischer Form wiederzufinden. Weiterhin sind die Ergebnisse der Berechnungen in der Auswertung des Versuchs in der Messwerttabelle verzeichnet.
- Auswertung
  Unter diesem Punkt findet der Anwender eine Anleitung zur Auswertung der Versuchsreihe. Falls möglich werden Diagramme der Messreihen erstellt, welche charakteristisch für den gewählten Betriebszustand sind. Bei kleinen Abweichungen der Parameter können Schwankungen in den Ergebnissen auftreten. Die dargestellten Kurvenverläufe können problemlos auf andere Betriebszustände übertragen werden und sollen dabei als Orientierungshilfe dienen. Weitere charakteristische Kurvenverläufe finden sich auch in der vorausgegangenen theoretischen Bearbeitung des entsprechenden Versuchsziels.
- Interpretation
  Falls eine ausführlichere Interpretation der Versuchsreihe sinnvoll erscheint, wird diese im letzten Gliederungspunkt gegeben.

Die Leistungsfähigkeit des Brennstoffzellen-Stacks steigt, je häufiger und länger die Zellen in Betrieb sind. So verändern sich über die Lebensdauer der Brennstoffzellen kontinuierlich die Eigenschaften und die Betriebsparameter. Bei längeren Betriebspausen trocknet die Membran der Zelle aus. Im anschließenden Betrieb wird die volle Leistungsfähigkeit erst nach einiger Zeit erreicht. Nach längeren Betriebspausen sollte das System vor Durchführung der Messungen einige Zeit betrieben werden., um die Leistungsfähigkeit der Zelle zu gewährleisten.
Die verschiedenen Messanordnungen sind für sich eigenständige Messungen und müssen nicht systematisch, der Reihenfolge nach abgearbeitet werden, sondern können auch punktuell ausgewählt werden. Gerade bei den umfassenderen Messungen kommt es vor, dass sich Teilmessungen aus den vorangegangenen Messaufbauten wiederholen. Zur Einarbeitung empfiehl es sich, die Messungen der Reihenfolge nach abzuarbeiten. Bei einer späteren Vermittlung des Wissens z.B. in Praktika ist vor dem Hintergrund der begrenzten Zeit, eine Auswahl oder Kombination der Versuche vorzunehmen. Diese kann aber erst nach Absprache der konkreten Ausrichtung des praktischen Teils des Wissenstransfers erfolgen und ist bei Kenntnis der gesamten Versuchsreihe beliebig variierbar.

8.1 Messung von Kennlinien der Brennstoffzelle

Versuchsziel:
Mit diesem Versuchsaufbau werden die grundlegenden charakteristischen Kennlinien eines Brennstoffzellenstacks erarbeitet. Die Spannung-Strom-Kennlinie soll aufgenommen und aus den gemessenen Werten für Spannung und Strom kann anschließend die Leistungskurve der Brennstoffzellen ermittelt werden. (vgl. Kapitel 4.5)

Versuchsdurchführung:
1. Bauen Sie den Versuch nach Versuchsaufbau A1 (Abbildung 12.1 im Anhang) oder alternativ ohne Durchflussmesser und Sicherheitsventil nach Versuchsaufbau A2 (Abbildung 12.2 im Anhang) auf.
2. Fahren Sie das System unter Beachtung der gesonderten Hinweise ordnungsgemäß an.
3. Öffnen Sie vorsichtig das Spülventil am Stack für ca. 1 Sekunde um das System zu spülen (nur bei Dead-end-Betrieb).
4. Stellen Sie eine Lüfterspannung von 6 V ein.
5. Betreiben Sie das System wahlweise im Dead-end-Betrieb oder im Durchflussbetrieb. Beachten Sie dabei die gesonderten Hinweise zu den Betriebsarten.
6. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle. Warten Sie ca. 1 Minute und nehmen Sie dann die Leerlaufspannung des Stacks auf.
7. Integrieren Sie die Last wieder in den Versuchsaufbau. Durch Variation der Belastung an der elektronischen Widerstandslast können Sie die angegebenen Stromwerte einstellen. Nach einer Wartezeit von 1 Minute pro Messpunkt zur Stabilisierung der Werte können die Daten für Spannung und Strom aufgenommen werden. Verweilen Sie nicht zu lange bei den Messpunkten, damit sich die Parameter Temperatur und Membranfeuchte nicht zu stark verändern. Dies gilt insbesondere für Stromstärken über 4 A.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Zellentemperatur über 45 °C steigt.

Messwerttabelle:
Hinweis: Nehmen Sie die Strom- und Spannungswerte bis auf 2 Kommastellen genau auf.

Systemdruck: 0,6 bar			
Lüfterspannung: 6 V			
	Messung		**Berechnung**
I [A]	**I [A]**	**U [V]**	**P [W]**
0	-	*8,77*	-
0,2	*0,20*	*7,88*	*1,58*
0,5	*0,50*	*7,35*	*3,68*
1,0	*1,02*	*6,84*	*6,98*
1,5	*1,49*	*6,57*	*9,79*
2,0	*2,01*	*6,31*	*12,69*
3,0	*3,02*	*5,98*	*18,06*
4,0	*4,05*	*5,78*	*23,41*
6,0	*6,02*	*5,31*	*31,97*
8,0	*8,01*	*4,89*	*39,17*
10,0	*10,08*	*4,50*	*45,36*
12,0	*12,04*	*4,12*	*49,60*

Tabelle 8.1: Messwerttabelle zur Kennlinienbestimmung

Auswertung:

1. Berechnen Sie für jeden Messpunkt die Leistung des Stacks aus den aufgenommen Werten für Spannung und Stromstärke.
2. Aus den gemessenen und errechneten Daten kann die Spannungs-Strom-Kennlinie und die Leistungskurve graphisch erstellt werden.

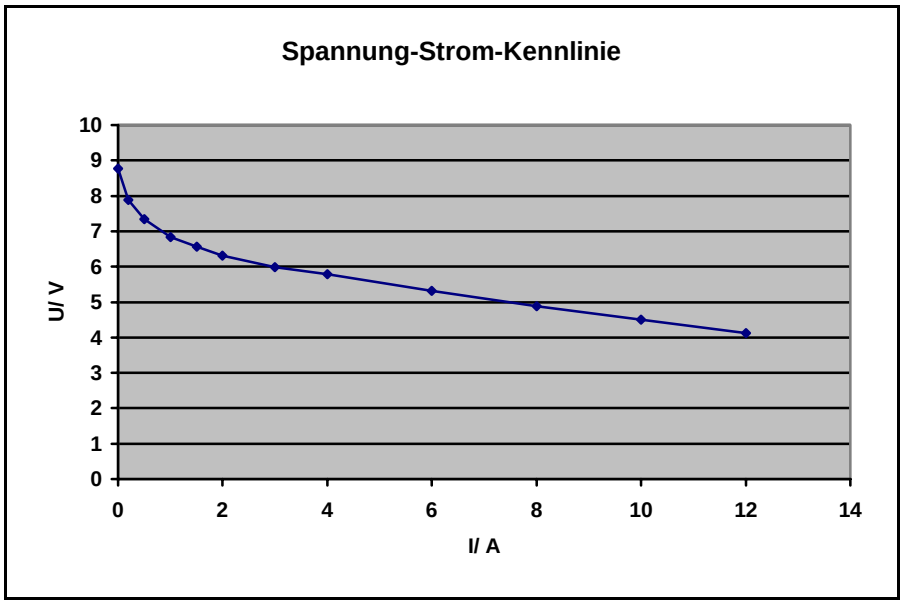

Abbildung 8.1: Spannung-Strom-Kennlinie

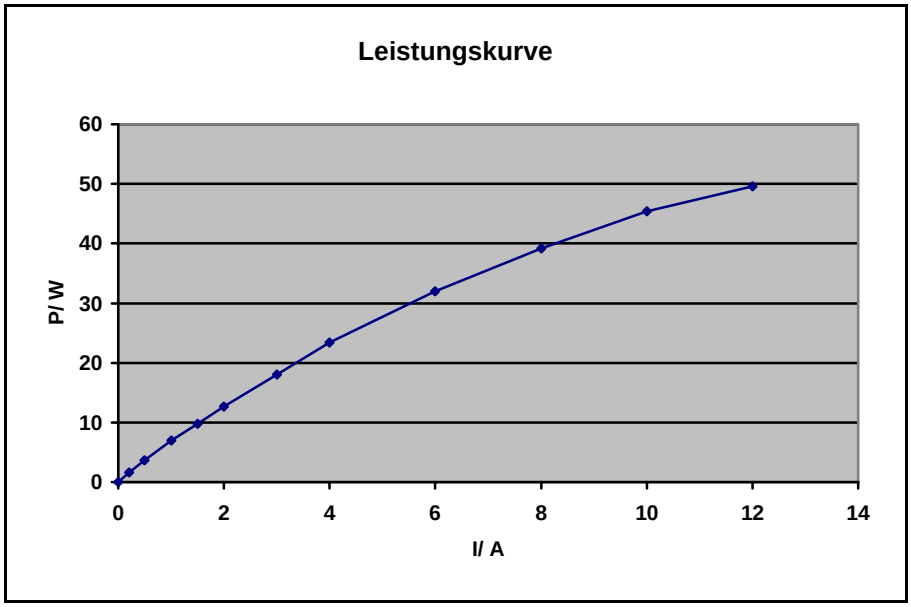

Abbildung 8.2: Leistungskurve

Bei der Datenaufnahme sind Schwankungen in den absoluten Werten möglich. Es sollten sich charakteristische Kennlinien ergeben, wie sie in Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2 zu sehen sind.

Interpretation:

Der Versuch zeigt, dass bei kleinen Strömen (nahe dem Leerlauf) die Spannung exponentiell fällt. Hier bestimmen die katalytischen Vorgänge an den Elektroden den Verlauf der

Spannung. Bei mittleren bis großen Strömen bestimmt der Innenwiderstand der Brennstoffzelle die Kennlinie. Es ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der Spannung vom Laststrom. Je höher der Innenwiderstand, desto steiler verläuft der lineare Teil der Kennlinie. Bei großen Strömen sind vor allem die Zuführung und die Konzentration der Gase ausschlaggebend für das Verhalten der Brennstoffzelle. Bei zu geringer Versorgung der Zellen mit den Reaktionsgasen bricht die Spannung zusammen, was sich in einem Abknicken der Kennlinie zeigt. (vgl Kapitel 4.4 „Elektrodenkinetik“)

Variation:

In einer Variation des Experimentes kann die Auswirkung der Lüfterspannung auf die Kennlinie verdeutlicht werden. Stellen Sie dazu die Lüfterspannung auf 0,5 V ein und wiederholen Sie den Versuch. Das Ergebnis sollte eine Kennlinienform zeigen, wie sie in Abbildung 8.3 dargestellt ist. In Folge der mangelnden Sauerstoffversorgung der Kathode bricht die Spannung bei höheren Strömen zusammen. Die Kennlinie knickt nach unten ab.

Systemdruck: 0,6 bar			
Lüfterspannung: 0,5 V			
	Messung		**Berechnung**
I [A]	**I [A]**	**U [V]**	**P [W]**
0	-	*8,83*	-
0,2	*0,19*	*8,08*	*1,54*
0,5	*0,50*	*7,52*	*3,76*
1,0	*1,02*	*7,08*	*7,08*
1,5	*1,49*	*6,86*	*10,22*
2,0	*1,99*	*6,66*	*13,25*
3,0	*3,05*	*6,35*	*19,37*
4,0	*4,00*	*6,03*	*24,12*
6,0	*6,02*	*4,97*	*29,92*
7,0	*7,02*	*1,2*	*8,41*
10,0	-	-	-
12,0	-	-	-

Tabelle 8.2: Messwerttabelle zur Kennlinienbestimmung in der Variation

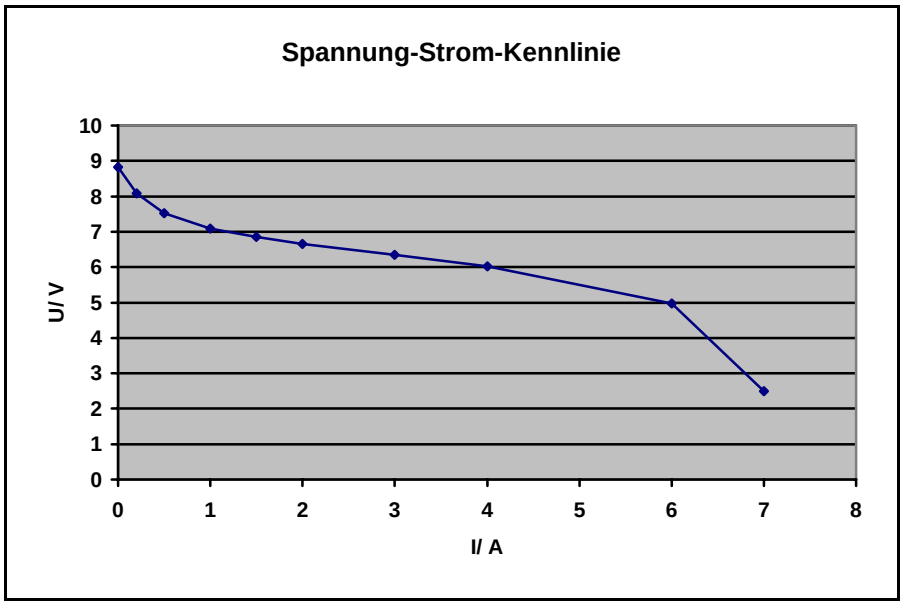

Abbildung 8.3: Spannung-Strom-Kennlinie bei verminderter Lüfterspannung

8.2 Wirkungsgradbestimmung

Versuchsziel:
Ziel dieser Messung ist den Spannungs-, Strom- und Energiewirkungsgrad des gesamten Brennstoffzellensystems zu bestimmen. Weiterhin wird der Stromwirkungsgrad des Brennstoffzellenstacks ermittelt. Dazu ist allerdings das Ergebnis für die Leckrate des Systems aus Versuch 8.3 erforderlich. Anschließend werden die Verläufe der Einzelwirkungsgrade graphisch dargestellt.

Versuchsdurchführung:
1. Bauen Sie den Versuch nach Versuchsaufbau A1 (Abbildung 12.1 im Anhang) auf.
2. Fahren Sie das System unter Beachtung der gesonderten Hinweise ordnungsgemäß an.
3. Öffnen Sie vorsichtig das Spülventil am Stack für ca. 1 Sekunde um das System zu spülen.
4. Stellen Sie eine Lüfterspannung von 6 V ein.
5. Betreiben Sie das System im Dead-end-Betrieb. Stellen Sie den gewünschten Systemdruck ein (empfohlener Mindestdruck 0,2 bar) und notieren ihn in der Tabelle. Beachten Sie die gesonderten Hinweise zu der Betriebsart.
6. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle. Warten Sie 1 Minute und nehmen Sie dann die Leerlaufspannung und den Wasserstoff-Durchfluss auf.
7. Integrieren Sie die Last wieder in den Versuchsaufbau. Stellen Sie mit der elektronischen Widerstandslast die vorgegebenen Stromwerte ein. Verändern Sie den Strom dabei nicht sprunghaft, da in diesem Fall die Strömungsbedingungen so stark gestört werden, dass es einige Minuten dauern kann, bis sich die Kugeln im Durchflussmesser wieder stabilisiert haben. Nach einer Wartezeit von 1 Minute pro Messpunkt zur Stabilisierung der Werte können die Daten für Strom, Spannung und Durchfluss aufgenommen werden. Verweilen Sie nicht zu lange bei den Messpunkten, damit sich die Parameter Temperatur und Membranfeuchte nicht zu stark verändern. Dies gilt insbesondere für Stromstärken über 4 A. Die Werte für den Wasserstoff-Durchfluss kann anhand der Position der schwarzen Glaskugel und der metallischen Kugel im Durchflussmesser bestimmt werden. Die schwarze Glaskugel ist zur Messung kleiner, die metallische Stahlkugel zur Erfassung großer Durchflüsse vorgesehen. Verwenden Sie die Stahlkugel, wenn diese beginnt ruhig zu schweben, damit eine höhere Messgenauigkeit erzielt wird. Maßgeblich bei der Ablesung der Werte ist die Mitte der Kugel.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Temperatur über 45 °C steigt.

Messwerttabelle:
Hinweis: Nehmen Sie die Strom- und Spannungswerte bis auf 2 Kommastellen und den Wasserstoff-Durchfluss bis auf einen ½ Teilstrich genau auf.

Systemdruck: 0,6 bar									
Lüfterspannung: 6V									
	Messungen				**Berechnungen**				
I [A]	**I [A]**	**U [V]**	**Kugel-position Glas [mm]**	**Kugel-position Stahl [mm]**	**Durch-fluss V^*_{H2} [Nml/min]**	**η_U**	**$\eta_{I,Sys}$**	**η_E**	**η_{BZ}**
0	-	*8,95*	-	-	-	*0,72*	-	-	-
0,2	*0,21*	*8,04*	-	-	-	*0,65*	-	-	-
0,5	*0,50*	*7,51*	*35,0*	-	*60*	*0,61*	*0,58*	*0,35*	*0,74*
1,0	*1,00*	*7,05*	*50,0*	-	*80*	*0,57*	*087*	*0,50*	-
1,5	*1,50*	*6,77*	*66,0*	*20,5*	*110*	*0,55*	*0,95*	*0,52*	-
2,0	*2,01*	*6,55*	*83,0*	*29,0*	*150*	*0,53*	*0,93*	*0,49*	-
3,0	*3,00*	*6,29*	*107,0*	*50,0*	*245*	*0,51*	*0,85*	*0,44*	*0,90*
4,0	*4,00*	*6,02*	*120,0*	*60,5*	*305*	*0,49*	*0,91*	*0,45*	*0,95*
6,0	*6,00*	*5,63*	-	*82,0*	*440*	*0,46*	*0,95*	*0,44*	*0,98*
8,0	*8,00*	*5,25*	-	*102,0*	*590*	*0,43*	*0,95*	*0,41*	*0,97*
10,0	*10,00*	*4,82*	-	*116,0*	*710*	*0,39*	*0,98*	*0,38*	*1*
12,0	*11,99*	*4,48*	-	-	--	*0,36*	-	-	-

Tabelle 8.3: Messwerttabelle zur Wirkungsgradbestimmung

Auswertung:

1. Bestimmen Sie mit Hilfe des Durchfluss-Diagramms (Abbildung 12.5 im Anhang) aus der Position der Kugel und dem Systemdruck den Wasserstoff-Durchfluss in Nml/ min.
2. Errechnen Sie den Spannungswirkungsgrad η_U (I) der Brennstoffzelle bezogen auf die theoretische Gleichgewichtsspannung der Wasserstoff-Sauerstoff-Reaktion.

$$\eta_U(I) = \frac{U(I)}{U_{ref}}$$

   Die Referenzspannung U_{ref} entspricht dabei der theoretischen Gleichgewichtsspannung der Wasserstoff-Sauerstoff-Reaktion von 1,23 V/ Zelle. Interessiert hingegen die energetische Gesamteffizienz des Prozesses, bezieht man sich auf den Heizwert von Wasserstoff, dem eine Referenzspannung von 1,254 V/ Zelle für den unteren Heizwert bzw. 1,482 V/ Zelle für den oberen Heizwert entspricht.(vgl. Kapitel 4.3.2)
3. Bestimmen Sie den Stromwirkungsgrad $\eta_{I,Sys}$ (I) des Systems. Verluste durch elektrochemische Nebenreaktionen und Undichtigkeiten werden mit dem Strom- oder Faradaywirkungsgrad ausgedrückt. Er ist das Verhältnis aus dem gemessenen Strom und dem, anhand des zugeführten Wasserstoff-Volumenstroms mit Hilfe des 1. Faradayschen Gesetzes berechneten, theoretisch möglichen Strom.

$$\eta_I(I) = \frac{I}{I_{th}}$$

$$I_{th} = \frac{\dot{V} * F * z}{V_m * n}$$

mit:

V^*	*Wasserstoff-Volumenstrom in l/s*
F	*Faraday-Konstante: 96.485 C/mol*
z	*Anzahl der Elektronen je Teilchenumsatz der Reaktion: z = 2*
V_m	*Molares Volumen bei 0 °C: 22,41410 l/mol*
n	*Anzahl der Zellen im Stack: 10*

4. Bestimmen Sie den Energiewirkungsgrad η_E (I) des Systems.

$$\eta_E = \eta_U * \eta_I$$

5. Der Stromwirkungsgrad $\eta_{I,Bz}$ (I) der Brennstoffzelle ist zu ermitteln. Dazu muss die Leckrate des Systems bekannt sein (vgl. Versuch 8.3). Man subtrahiert den Leckvolumenstrom von dem gemessenen Wasserstoff-Volumenstrom und berechnet den Stromwirkungsgrad mit den korrigierten Werten für den Volumenstrom.
6. Erstellen Sie ein Wirkungsgrad-Strom-Diagramm mit dem Spannungswirkungsgrad η_U (I), dem Stromwirkungsgrad $\eta_{I,Sys}$ (I) und dem Energiewirkungsgrad η_E (I).

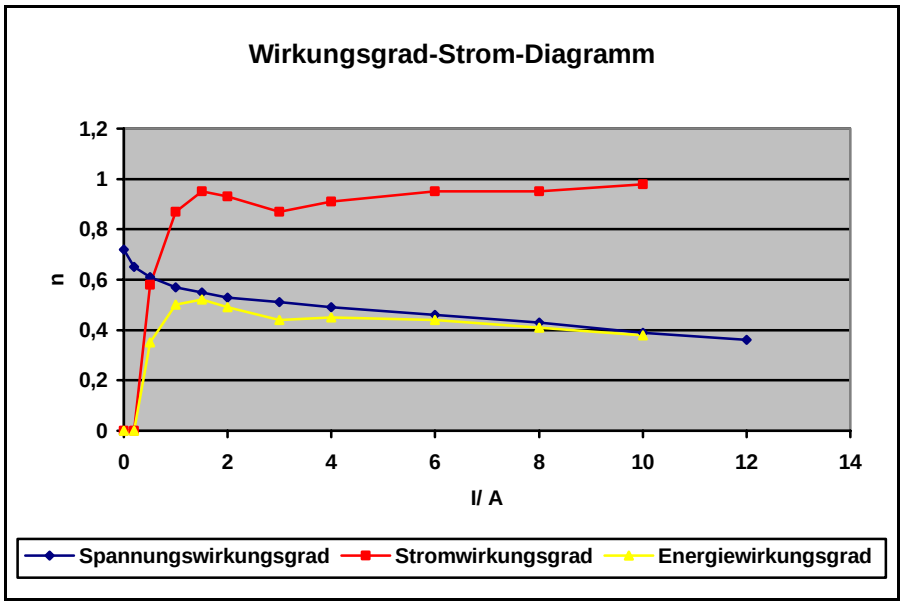

Abbildung 8.4: Wirkungsgrade eines Brennstoffzellensystems

Interpretation:
Detaillierte Ausführungen zur Interpretation der Ergebnisse der einzelnen Wirkungsgrade in Bezug auf die Entstehung, die Bestimmung und den Verlauf werden in Kapitel 4.3 „Wirkungsgrade“ gegeben.

Bei der Aufnahme der Werte für den Wasserstoff-Durchfluss und die Ermittlung des Volumenstroms ist mit einer hohen Genauigkeit zu arbeiten. Geringe Abweichungen wirken sich direkt auf die Werte für die einzelnen Wirkungsgrade aus. In der durchgeführten Versuchsreihe sind geringe Ungenauigkeiten aufgetreten, die auf die geringen Betriebsstunden des Systems zurückzuführen sind. In einigen Messpunkten ergeben sich für den Kurvenverlauf untypische Werte für die einzelnen Wirkungsgrade. In Abbildung 8.5 sind die typischen Kurvenverläufe für die Wirkungsgrade dargestellt. Bei der Durchführung weiterer Messreihen ist der in der folgenden Abbildung gezeigte Kurvenverlauf anzustreben.

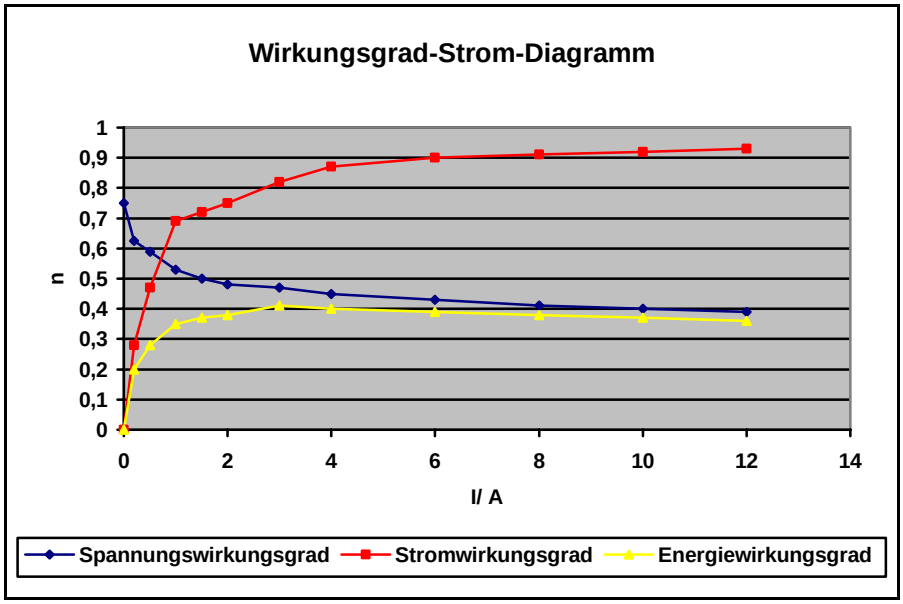

Abbildung 8.5: Idealer Kurvenverlauf für die einzelnen Wirkungsgrade

8.3 Bestimmung der Leckrate des Systems

Versuchsziel:
Mit diesem Versuchaufbau wird die Leckrate des Brennstoffzellensystems bestimmt. Nicht die gesamte Wasserstoffmenge kann im System energetisch umgesetzt werden. Der Anteil, der dem System für die chemische Umwandlung durch Undichtigkeiten und Diffusion verloren geht, wird in diesem Zusammenhang ermittelt. Die Ergebnisse lassen erkennen, ob in der Anordnung größere Leckagen vorhanden sind.

Versuchsdurchführung:
1. Bauen Sie den Versuch nach Versuchsaufbau A1 (Abbildung 12.1 im Anhang) auf.
2. Fahren Sie das System unter Beachtung der gesonderten Hinweise ordnungsgemäß an.
3. Öffnen Sie vorsichtig das Spülventil am Stack für ca. 1 Sekunde um das System zu spülen.
4. Stellen Sie eine Lüfterspannung von 6 V ein.
5. Betreiben Sie das System im Dead-end-Betrieb. Stellen Sie den gewünschten Systemdruck ein (empfohlener Mindestdruck 0,2 bar) und notieren ihn in der Tabelle. Beachten Sie die gesonderten Hinweise zu der Betriebsart.
6. Stellen Sie mit der elektronischen Widerstandslast die vorgegebenen Stromwerte ein. Verändern Sie den Strom dabei nicht sprunghaft, da in diesem Fall die Strömungsbedingungen so stark gestört werden, dass es einige Minuten dauern kann bis sich die Kugeln im Durchflussmesser wieder stabilisiert haben. Nach einer Wartezeit von 1 Minute pro Messpunkt zur Stabilisierung der Werte können die Daten für Strom und Durchfluss aufgenommen werden. Verweilen Sie nicht zu lange bei den Messpunkten, damit sich die Parameter Temperatur und Membranfeuchte nicht zu stark verändern. Dies gilt insbesondere für Stromstärken über 4 A. Anhand der Position der metallischen Kugel im Durchflussmesser kann der Durchfluss bestimmt werden. Maßgeblich bei der Ablesung ist die Mitte der Kugel.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Temperatur über 45 °C steigt.

Messwerttabelle:
Hinweis: Nehmen Sie die Stromwerte bis auf 2 Kommastellen und den Wasserstoff-Durchfluss bis auf einen ½ Teilstrich genau auf.

Systemdruck: 0,6 bar						
Lüfterspannung: 6 V						
	Messungen		**Berechnungen**			
I [A]	**I [A]**	**Position Stahlkugel [mm]**	**Durchfluss V^*_{H2} [Nml/ min]**	**V^*_{th} [Nml/ min]**	**$V^*_{th} - V^*_{H2}$ [Nml/ min]**	**Mittelwert [Nml/ min]**
4,0	*4,01*	*60,0*	*300*	*279*	*- 21*	*12,75*
6,0	*6,01*	*80,0*	*425*	*419*	*-6*	
8,0	*8,01*	*100,0*	*570*	*558*	*-12*	
10,0	*10,02*	*116,0*	*710*	*698*	*-12*	

Tabelle 8.4: Messwerttabelle zur Bestimmung der Leckrate des Systems

Auswertung:

1. Bestimmen Sie mit Hilfe des Durchfluss-Diagramms (Abbildung 12.5 im Anhang) aus der Position der Kugel und dem Systemdruck den Wasserstoff-Durchfluss in Nml/ min.
2. Berechnen Sie für die eingestellten Stromwerte den theoretisch notwendigen Verbrauch V^*_{th} aus dem Faradayschen Gesetz unter der Annahme, dass der Stromwirkungsgrad der Brennstoffzellenreaktion 1 sei.

$$\dot{V}_{th} = \frac{n * I * V_m}{F * z}$$

mit:	V^*_{th}	*theoretischer Wasserstoff-Volumenstrom in l/s*
	I	*gemessene Stromstärke in A*
	F	*Faraday-Konstante: 96.485 C/mol*
	z	*Anzahl der Elektronen je Teilchenumsatz der Reaktion: z = 2*
	V_m	*Molares Volumen bei 0 °C: 22,41410 l/mol*
	n	*Anzahl der Zellen im Stack: 10*

3. Bilden Sie für die einzelnen Datenpunkte die Differenz aus dem tatsächlichen und dem theoretischen Durchfluss.
4. Errechnen Sie den arithmetischen Mittelwert aus den einzelnen Differenzen. Er ist ein Maß für die Leckrate des Systems.

Interpretation:

Bei der Bestimmung der Leckrate wird die Annahme getroffen, der Stromwirkungsgrad sei 1. Es finden also keine elektrochemischen Nebenreaktionen statt. Alle Verluste an Wasserstoff werden den Undichtigkeiten des Systems zugeschrieben. Das gilt auch für den sogen. „Cross over“.

Unter “Cross-over” versteht man die Diffusion molekularen Wasserstoff durch den Membranelektrolyten hindurch auf die Sauerstoffseite der Brennstoffzelle. Die Diffusionsrate ist abhängig von der Druckdifferenz der beiden Gaselektroden, der elektrischen Belastung der Brennstoffzelle und von der Art und Dicke der Membran.

Die Leckrate des Systems ist druckabhängig und muss für jeden Systemdruck neu bestimmt werden. Bei korrekter Durchführung des Versuches sollten sich bei Drücken unterhalb von 2,0 bar_{abs} Leckraten nicht über 15 ml/min ergeben. Sollte der Grenzwert überschritten werden, besteht ein deutliches Leck im System und ein Weiterarbeiten ist erst nach Behebung der Leckage möglich.

8.4 Einflussgrößen der Kennlinie

Versuchsziel:
Bei dieser Anordnung werden in drei Teilversuchen unterschiedliche Spannung-Strom-Kennlinien aufgenommen. Zunächst die schon aus Versuch 8.1 bekannte Basiskennlinie im normalen Betriebszustand. Anschließend werden die Betriebsparameter Innenwiderstand und Luftversorgung der Zellen variiert. Der Versuch verdeutlicht die Einflussgrößen auf die Kennlinie einer Brennstoffzelle.

Versuchsdurchführung:

Teilversuch A: Basiskennlinie
1. Bauen Sie den Versuch nach Versuchsaufbau A1 (Abbildung 12.1 im Anhang) oder alternativ ohne Durchflussmesser und Sicherheitsventil nach Versuchsaufbau A2 (Abbildung 12.2 im Anhang) auf.
2. Fahren Sie das System unter Beachtung der gesonderten Hinweise ordnungsgemäß an.
3. Öffnen Sie vorsichtig das Spülventil am Stack für ca. 1 Sekunde um das System zu spülen (nur bei Dead-end-Betrieb).
4. Stellen Sie eine Lüfterspannung von 6 V ein.
5. Betreiben Sie das System im Dead-end-Betrieb oder im Durchflussbetrieb. Beachten Sie dabei die gesonderten Hinweise zu den Betriebsarten.
6. Notieren Sie die Starttemperatur des Teilversuchs.
7. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle. Warten Sie ca. 1 Minute und nehmen Sie dann die Leerlaufspannung des Stacks auf.
8. Integrieren Sie die Last wieder in den Versuchsaufbau. Durch Variation der Belastung können Sie die angegebenen Stromwerte einstellen. Nach einer Wartezeit von 1 Minute pro Messpunkt zur Stabilisierung der Werte können die Daten für Spannung und Strom aufgenommen werden. Verweilen Sie nicht zu lange bei den Messpunkten, damit sich die Parameter Temperatur und Membranfeuchte nicht zu stark verändern. Dies gilt insbesondere für Stromstärken über 4 A.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Temperatur über 45 °C steigt.

Teilversuch B: Messung mit einem zusätzlichen Serienwiderstand
Um den Einfluss des Innenwiderstandes der Zelle auf die Kennlinie zu simulieren wird ein externer Leistungwiderstand (0,05 Ohm/ 25 Watt) in Reihe zum Stack geschaltet. In diesem Fall wird damit ein vergrößerter Innenwiderstand simuliert.

1. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle.
2. Lassen Sie den Lüfter weiterlaufen, um den Stack zu kühlen (empfohlene Spannung 2 V)
3. Integrieren Sie den Serienwiderstand entsprechend Versuchsaufbau A3 (Abbildung 12.3 im Anhang) in die Versuchsanordnung
4. Ist die Temperatur des Stacks auf den Wert des vorangegangenen Teilversuchs abgesunken, kann mit der Messung begonnen werden. Um die Messreihen vergleichbar zu machen behalten Sie die Werte der Parameter Druck und Lüfterspannung bei. Führen Sie die Schritte 3-8 des Teilversuchs A durch.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Temperatur über 45 °C steigt.

Teilversuch C: Messung mit verminderter Luftversorgung

In diesem Teilversuch wird die Lüfterspannung und damit die Luftversorgung und die Kühlung der Zelle vermindert.

1. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle.
2. Lassen Sie den Lüfter weiterlaufen, um den Stack zu kühlen (empfohlene Spannung 2 V).
3. Entfernen Sie den Serienwiderstand und stellen die Versuchsanordung aus dem Teilversuch A nach Versuchsaufbau A1 oder A2 (Abbildung 12.1 bzw. Abbildung 12.2 im Anhang) wieder her.
4. Ist die Temperatur des Stacks auf den Wert des vorangegangenen Teilversuchs abgesunken, kann mit der Messung begonnen werden. Um die Messreihen vergleichbar zu machen behalten Sie den Wert des Parameters Druck bei. Stellen Sie eine Lüfterspannung von 0,5 V ein. Führen Sie die Schritte 3-8 des Teilversuchs A durch.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Temperatur über 45 °C steigt.

Messwerttabelle:

Hinweis: Nehmen Sie die Strom- und Spannungswerte bis auf 2 Kommastellen genau auf.

Systemdruck: 0,6 bar						
	Messwerte					
	Teilversuch A		**Teilversuch B**		**Teilversuch C**	
Starttemperatur:	**25,8 °C**		**27,1 °C**		**28,0 °C**	
Lüfterspannung:	**6 V**		**6 V**		**0,5 V**	
I [A]	**I [A]**	**U [V]**	**I [A]**	**U [V]**	**I [A]**	**U [V]**
0	-	*9,13*	-	*8,97*	-	*8,94*
0,2	*0,21*	*8,41*	*0,21*	*8,26*	*0,20*	*8,27*
0,5	*0,50*	*7,92*	*0,50*	*7,82*	*0,50*	*7,86*
1,0	*1,00*	*7,43*	*1,01*	*7,36*	*1,01*	*7,50*
1,5	*1,50*	*7,13*	*1,50*	*7,03*	*1,51*	*7,15*
2,0	*2,01*	*6,92*	*2,02*	*6,62*	*2,00*	*6,95*
3,0	*3,01*	*6,57*	*3,00*	*6,17*	*3,01*	*6,51*
4,0	*4,01*	*6,29*	*4,00*	*5,87*	*4,00*	*6,19*
6,0	*6,02*	*5,83*	*6,00*	*5,24*	*6,02*	*5,62*
8,0	*8,02*	*5,37*	*8,02*	*4,62*	*8,01*	*5,02*
10,0	*10,02*	*4,96*	*10,03*	*3,94*	*9,00*	*4,00*
12,0	*12,03*	*4,54*	-	-	-	-
Berechnungen						
	R_i [Ω]		**R_i [Ω]**		**R_i [Ω]**	
	0,23		*0,31*		*0,28*	

Tabelle 8.5: Messwerttabelle zu den Einflussfaktoren auf die Spannung-Strom-Kennlinie

Auswertung:

1. Erstellen Sie für die Basiskennlinie ein Spannung-Strom-Diagramm.
2. Bestimmen Sie anhand dieser Kennlinie graphisch den Innwiderstand des Stacks.

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

3. Tragen Sie die Werte für den Teilversuch B in das Diagramm ein und bestimmen Sie auch hier den Innenwiderstand des Stacks.
4. Tragen Sie die Datenpunkte aus dem Teilversuch C in das Diagramm ein und bestimmen Sie wie in den anderen Teilversuchen den Innenwiderstand.

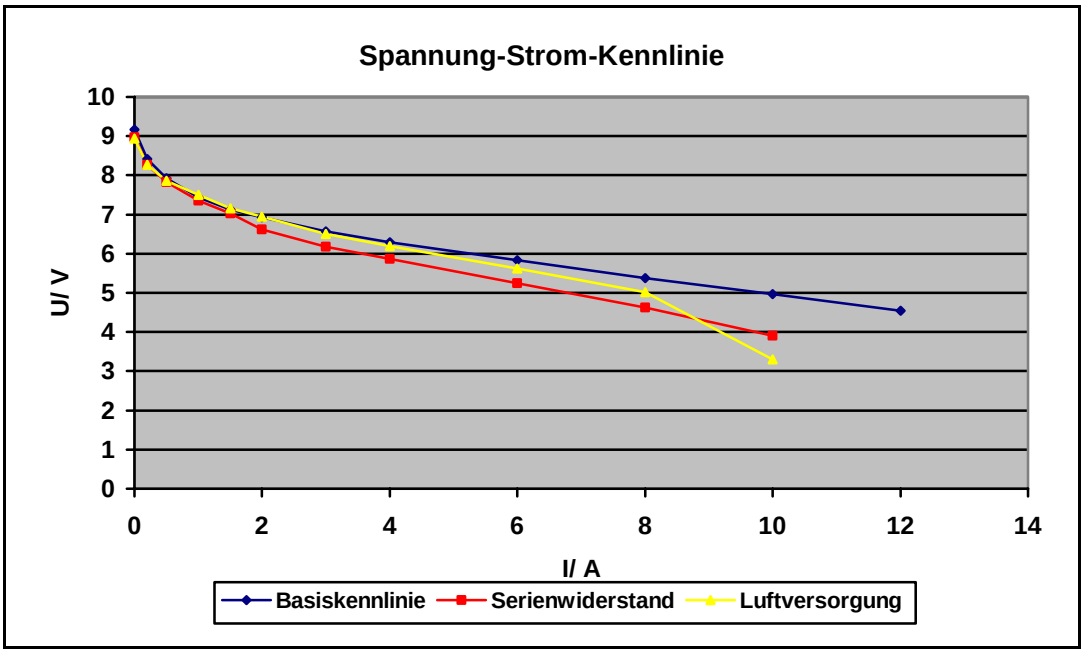

Abbildung 8.6: Spannung-Strom-Kennlinie bei verschiedenen Einflussfaktoren

Interpretation:

Die drei Versuche zeigen, dass bei kleinen Strömen (nahe dem Leerlauf) die Spannung exponentiell fällt. Hier bestimmen die katalytischen Vorgänge an den Elektroden den Verlauf der Spannung. Bei mittleren bis großen Strömen bestimmt der Innenwiderstand der Brennstoffzelle die Kennlinie. Es ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der Spannung vom Laststrom. Je höher der Innenwiderstand, desto steiler verläuft der lineare Teil der Kennlinie. Dieser Zusammenhang wird in Teilversuch B deutlich. Bei großen Strömen ist vor allem die Versorgung der Zellen mit den Reaktionsgasen ausschlaggebend für das Verhalten der Brennstoffzelle. Bei zu geringer Versorgung der Zellen mit den Reaktanten bricht die Spannung schon bei kleineren Strömen zusammen, was sich im Abknicken der Kennlinie im Teilversuch C zeigt.

Bei der Berechnung der Innenwiderstände für die drei Teilversuche zeigt sich die unterschiedliche Steigung im linearen Bereich der Kennlinie. Bei der Integration des zusätzlichen Innenwiderstandes ist auf möglichst kurze und niederohmige Verbindungen zu achten, um den Innenwiderstand der Zelle nicht zusätzlich zu vergrößern.

8.5 Wirkungsgrade eines Brennstoffzellensystems

Versuchsziel:
Diese Versuchsreihe stellt die Einzelwirkungsgrade eines Brennstoffzelle-Stacks denen eines autonomen, netzunabhängigen Systems gegenüber. In der graphischen Darstellung des Systemwirkungsgrades wird der Einfluss der peripheren Einrichtungen auf die Parameter des Systems deutlich.

Teilversuch A: Bestimmung des Strom- und Spannungswirkungsgrades des Stacks

Versuchsdurchführung:
1. Bauen Sie den Versuch nach Versuchsaufbau A1 (Abbildung 12.1 im Anhang) auf.
2. Fahren Sie das System unter Beachtung der gesonderten Hinweise ordnungsgemäß an.
3. Öffnen Sie vorsichtig das Spülventil am Stack für ca. 1 Sekunde um das System zu spülen.
4. Stellen Sie eine Lüfterspannung von 6 V ein.
5. Betreiben Sie das System im Dead-end-Betrieb. Stellen Sie den gewünschten Systemdruck ein (empfohlener Mindestdruck 0,2 bar) und notieren ihn in der Tabelle. Beachten Sie die gesonderten Hinweise zu der Betriebsart.
6. Notieren Sie die Starttemperatur des Stacks.
7. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle. Warten Sie 1 Minute und nehmen Sie dann die Leerlaufspannung und den Wasserstoff-Durchfluss auf.
8. Integrieren Sie die Last wieder in den Versuchsaufbau. Stellen Sie mit der elektronischen Widerstandslast die vorgegebenen Stromwerte ein. Verändern Sie den Strom dabei nicht sprunghaft, da in diesem Fall die Strömungsbedingungen so stark gestört werden, dass es einige Minuten dauern kann bis sich die Kugeln im Durchflussmesser wieder stabilisiert haben. Nach einer Wartezeit von 1 Minute pro Messpunkt zur Stabilisierung der Werte können die Daten für Spannung und Durchfluss aufgenommen werden. Verweilen Sie nicht zu lange bei den Messpunkten, damit sich die Parameter Temperatur und Membranfeuchte nicht zu stark verändern. Dies gilt insbesondere für Stromstärken über 4 A. Nehmen Sie die Werte für die Parameter Strom, Spannung und Wasserstoff-Durchfluss auf. Anhand der Position der schwarzen Glaskugel und der metallischen Kugel im Durchflussmesser kann der Durchfluss bestimmt werden. Die schwarze Glaskugel ist zur Messung kleiner, die metallische Stahlkugel zur Erfassung großer Durchflüsse vorgesehen. Verwenden Sie die Stahlkugel, wenn diese beginnt ruhig zu schweben, damit eine höhere Messgenauigkeit erzielt wird. Maßgeblich bei der Ablesung ist die Mitte der Kugel.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Temperatur über 45 °C steigt.

Messwerttabelle:
Hinweis: Nehmen Sie die Strom- und Spannungswerte bis auf 2 Kommastellen und den Wasserstoff-Durchfluss bis auf einen ½ Teilstrich genau auf.

Systemdruck: 0,6 bar									
Lüfterspannung: 6 V									
Temperatur: 29,7 °C									
	Messungen				**Berechnungen**				
I [A]	**I [A]**	**U [V]**	**Kugel position Glas [mm]**	**Kugel position Stahl [mm]**	**Durchfluss $\dot{V}^*_{H2}$ [Nml/min]**	**η_U**	**$\eta_{I,Sys}$**	**η_E**	**η_{Sys}**
0	-	*9,01*	-	-	-	*0,72*	-	-	*Teil-versuch B*
0,2	*0,20*	*8,31*	-	-	-	*0,66*	-	-	
0,5	*0,50*	*7,85*	*45,0*	-	*72*	*0,63*	*0,48*	*0,30*	
1,0	*1,00*	*7,43*	*66,0*	-	*110*	*0,59*	*0,63*	*0,37*	
1,5	*1,50*	*7,23*	*80,0*	-	*140*	*0,58*	*0,74*	*0,43*	
2,0	*2,03*	*7,05*	*92,0*	*35,0*	*175*	*0,56*	*0,79*	*0,44*	
3,0	*3,02*	*6,66*	*113,0*	*49,0*	*240*	*0,53*	*0,87*	*0,46*	
4,0	*4,00*	*6,41*	-	*60,5*	*305*	*0,51*	*0,91*	*0,47*	
6,0	*6,01*	*5,91*	-	*80,5*	*430*	*0,47*	*0,97*	*0,46*	
8,0	*8,02*	*5,45*	-	*102,0*	*590*	*0,44*	*0,94*	*0,41*	
10,0	*10,00*	*5,02*	-	*117,0*	*720*	*0,40*	*0,97*	*0,39*	
12,0	*12,00*	*4,59*	-	-	-	*0,37*	-	-	

Tabelle 8.6: Messwerttabelle zur Bestimmung der Stack-Wirkungsgrade

Teilversuch B: Bestimmung des Wirkungsgrades des Systems bei autonomen Betrieb

Für den Betrieb des Lüfters benötigt das Brennstoffzellen-System Hilfsenergie. Diese kann direkt dem System entnommen werden, indem die Lüfterregelung über einen Gleichspannungswandler versorgt wird. Der Teilversuch B simuliert einen netzunabhängigen Betrieb.

Versuchsdurchführung:

1. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle.
2. Lassen Sie den Lüfter weiterlaufen um den Stack bis zur Starttemperatur zu kühlen (empfohlene Spannung 2 V).
3. Realisieren Sie den netzunabhängigen Betrieb, indem Sie die Versuchsanordnung entsprechend Versuchsaufbau A4 (Abbildung 12.4 im Anhang) umbauen.
4. Ist die Temperatur des Stacks auf den Wert des vorangegangenen Teilversuchs abgesunken, kann mit der Messung begonnen werden. Um die Messreihen vergleichbar zu machen, behalten Sie die Werte der Parameter Druck und Lüfterspannung bei. Führen Sie die Schritte 3-8 des Teilversuchs A durch.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Temperatur über 45 °C steigt.

Messwerttabelle:

Hinweis: Nehmen Sie die Spannungs- und Stromwerte bis auf 2 Kommastellen und den Wasserstoff-Durchfluss bis auf einen ½ Teilstrich genau auf.

Systemdruck: 0,6 bar									
Lüfterspannung: 6 V									
Temperatur: 27,8 °C									
	Messungen				**Berechnungen**				
I [A]	**I [A]**	**U [V]**	**Kugel position Glas [mm]**	**Kugel position Stahl [mm]**	**Durchfluss V^*_{H2} [Nml/min]**	**η_U**	**$\eta_{I,Sys}$**	**η_E**	**η_{Sys}**
0	-	*8,18*	-	-	-	*0,65*	-	-	-
0,2	*0,21*	*7,82*	-	-	-	*0,62*	-	-	-
0,5	*0,51*	*7,47*	*30,0*	-	*40*	*0,59*	*0,37*	*0,22*	*0,73*
1,0	*1,01*	*7,10*	*56,0*	-	*80*	*0,57*	*0,45*	*0,26*	*0,70*
1,5	*1,50*	*6,90*	*75,0*	-	*130*	*0,55*	*0,55*	*0,30*	*0,69*
2,0	*2,02*	*6,66*	*107,0*	*45,0*	*220*	*0,53*	*0,65*	*0,34*	*0,77*
3,0	*3,01*	*6,38*	-	*58,0*	*290*	*0,51*	*0,73*	*0,37*	*0,80*
4,0	*4,00*	*6,10*	-	*68,0*	*350*	*0,49*	*0,80*	*0,39*	*0,83*
6,0	*6,00*	*5,65*	-	*82,0*	*440*	*0,45*	*0,94*	*0,41*	*0,89*
8,0	*8,00*	*5,16*	-	*102,0*	*590*	*0,41*	*0,95*	*0,38*	*0,93*
10,0	*10,00*	*4,74*	-	*117,5*	*725*	*0,38*	*0,96*	*0,36*	*0,93*
12,0	*12,00*	*4,29*	-	-	-	*0,34*	-	-	-

Tabelle 8.7: Messwerttabelle zur Bestimmung der Systemwirkungsgrade bei autonomen Betrieb

Auswertung:

1. Bestimmen Sie mit Hilfe des Durchfluss-Diagramms (Abbildung 12.5 im Anhang) aus der Position der Kugel und dem Systemdruck den Wasserstoff-Durchfluss in Nml/ min für die beiden Teilversuche.
2. Errechnen Sie für beide Teilversuche den Spannungswirkungsgrad $\eta_U(I)$ der Brennstoffzelle bezogen auf den Gesamteffizienz der Wasserstoff-Sauerstoff-Reaktion.

$$\eta_U(I) = \frac{U(I)}{U_{ref}}$$

Die Referenzspannung U_{ref} bezieht sich auf den unteren Heizwert von Wasserstoff und ergibt sich zu 1,254 V/ Zelle.(vgl. Kapitel 4.3.2)

7. Bestimmen Sie den Strom- oder Faradaywirkungsgrad $\eta_I(I)$ für beide Teilversuche. Er ist das Verhältnis aus dem gemessenen Strom und dem, anhand des zugeführten Wasserstoff-Volumenstroms mit Hilfe des 1. Faradayschen Gesetzes berechneten, theoretisch möglichen Strom. Mit steigendem Strom nähert er sich dem Wert 1 an.

$$\eta_I(I) = \frac{I}{I_{th}}$$

$$I_{th} = \frac{\dot{V} * F * z}{V_m * n}$$

mit:		
	V^*	*Wasserstoff-Volumenstrom in l/s*
	F	*Faraday-Konstante: 96.485 C/mol*
	z	*Anzahl der Elektronen je Teilchenumsatz der Reaktion: z = 2*
	V_m	*Molares Volumen bei 0 °C: 22,41410 l/mol*
	n	*Anzahl der Zellen im Stack: 10*

8. Für beide Teilversuche ist der Energiewirkungsgrad η_E (I) zu bestimmen.

$$\eta_E = \eta_U * \eta_I$$

9. Tragen Sie die berechneten Wirkungsgrade beider Teilversuche in ein Wirkungsgrad-Strom-Diagramm ein.
10. Kennzeichnen Sie die Fläche, die den Eigenverbrauch des Systems veranschaulicht. Es ist die Fläche zwischen den beiden Kurven für die Energiewirkungsgrade.
11. Der Systemwirkungsgrad ist im Energiewirkungsgrad des zweiten Teilversuchs enthalten:

$$\eta_{E(2)} = \eta_{U(2)} * \eta_{I(2)}$$

$$\eta_{E(2)} = \eta_{U(1)} * \eta_{SysU} * \eta_{I(1)} * \eta_{SysI}$$

$$\eta_{E(2)} = \eta_{E(1)} * \eta_{Sys}$$

$$\eta_{Sys}(I) = \frac{\eta_{E(2)}}{\eta_{E(1)}}$$

12. Bestimmen Sie graphisch den Verlauf des Systemwirkungsgrades

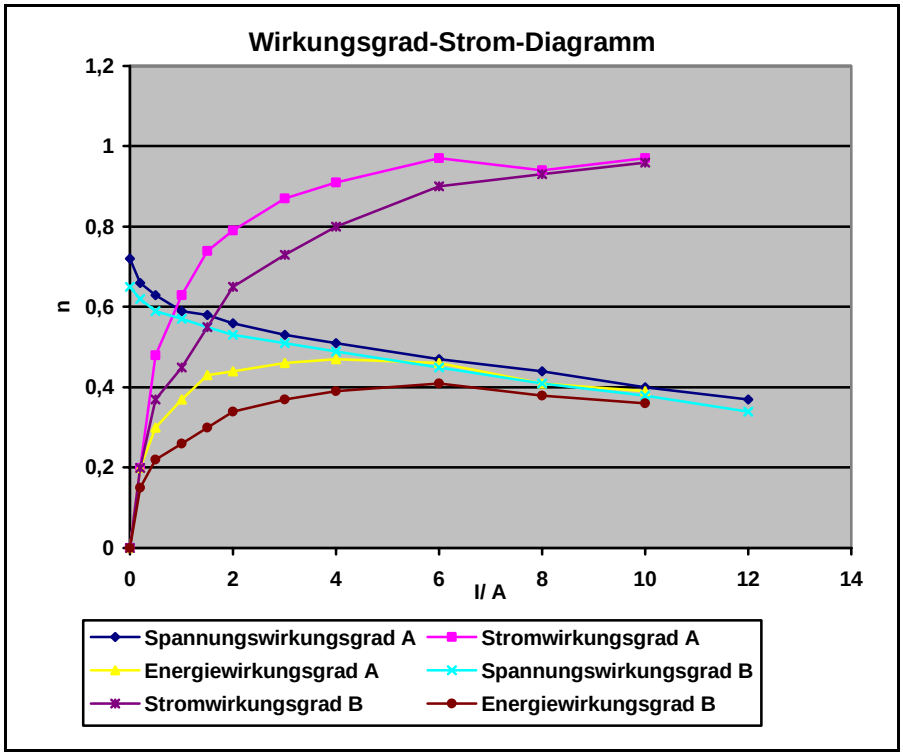

Abbildung 8.7: Wirkungsgrad-Strom-Diagramm der beiden Teilversuche

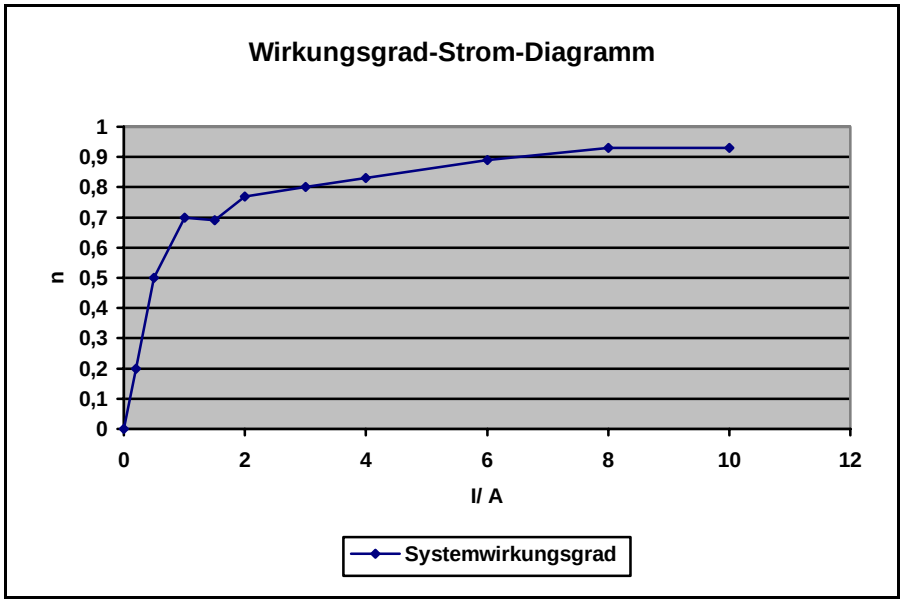

Abbildung 8.8: Graphischer Verlauf des Systemwirkungsgrades

Interpretation:
Im Teilversuch B wird ein Teil der erzeugten Energie zur Versorgung der Peripherie genutzt. Bei der vorliegenden Messanordnung drückt sich dieses durch einen erhöhten Wasserstoff-Durchfluss als auch in einer kleineren Nutzleistung gegenüber dem Teilversuch A aus. Da als Bezugsgröße der Laststrom gewählt wurde, ändert sich auch der Spannungs- und Stromwirkungsgrad. Im Teilversuch B liegen die Wirkungsgrade deutlich niedriger als in Teilversuch A. Das Maximum des Energiewirkungsgrades verschiebt sich in Teilversuch B zu größeren Lastströmen.

Abbildung 8.8 kennzeichnet den Verlauf des Systemwirkungsgrades. Da der absolute Energieverbrauch der Peripherie über den gesamten Lastbereich konstant ist, nimmt dessen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad mit steigendem Laststrom ab. Es ergibt sich eine Annäherung des Systemwirkungsgrades an 1.

8.6 Maximale Leistung vs. Optimaler Wirkungsgrad

Versuchsziel:
Diese Messreihe hat das Ziel, den Energiewirkungsgrad und die Leistung eines Brennstoffzellensystems aufzunehmen. In einer graphischen Darstellung werden die beiden Parameter gegenübergestellt, um die Punkte des optimalen Wirkungsgrades und der maximalen Leistung im konkreten Anwendungsfall zu beurteilen.

Versuchsdurchführung:
1. Bauen Sie den Versuch nach Versuchsaufbau A1 (Abbildung 12.1 im Anhang) auf.
2. Fahren Sie das System unter Beachtung der gesonderten Hinweise ordnungsgemäß an.
3. Öffnen Sie vorsichtig das Spülventil am Stack für ca. 1 Sekunde um das System zu spülen.
4. Stellen Sie eine Lüfterspannung von 6 V ein.
5. Betreiben Sie das System im Dead-end-Betrieb. Stellen Sie den gewünschten Systemdruck ein (empfohlener Mindestdruck 0,2 bar) und notieren ihn in der Tabelle. Beachten Sie die gesonderten Hinweise zu der Betriebsart.
6. Notieren Sie die Starttemperatur des Stacks.
7. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle. Warten Sie 1 Minute und nehmen Sie dann die Leerlaufspannung und den Wasserstoff-Durchfluss auf.
8. Integrieren Sie die Last wieder in den Versuchsaufbau. Stellen Sie mit der elektronischen Widerstandslast die vorgegebenen Stromwerte ein. Verändern Sie den Strom dabei nicht sprunghaft, da in diesem Fall die Strömungsbedingungen so stark gestört werden, dass es einige Minuten dauern kann bis sich die Kugeln im Durchflussmesser wieder stabilisiert haben. Nach einer Wartezeit von 1 Minute pro Messpunkt zur Stabilisierung der Werte können die Daten für Strom, Spannung und Durchfluss aufgenommen werden.. Verweilen Sie nicht zu lange bei den Messpunkten, damit sich die Parameter Temperatur und Membranfeuchte nicht zu stark verändern. Dies gilt insbesondere für Stromstärken über 4 A. Anhand der Position der schwarzen Glaskugel und der metallischen Kugel im Durchflussmesser kann der Wasserstoff-Durchfluss bestimmt werden. Die schwarze Glaskugel ist zur Messung kleiner, die metallische Stahlkugel zur Erfassung großer Durchflüsse vorgesehen. Verwenden Sie die Stahlkugel, wenn diese beginnt ruhig zu schweben, damit eine höhere Messgenauigkeit erzielt wird. Maßgeblich bei der Ablesung ist die Mitte der Kugel.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Temperatur über 45 °C steigt.

Messwerttabelle:
Hinweis: Nehmen Sie die Stromwerte bis auf 2 Kommastellen und den Wasserstoff-Durchfluss bis auf einen ½ Teilstrich genau auf.

Systemdruck: 0,6 bar									
Lüfterspannung: 6 V									
	Messungen				**Berechnungen**				
I [A]	**I [A]**	**U [V]**	**Kugel position Glas [mm]**	**Kugel position Stahl [mm]**	**Durchfluss V^*_{H2} [Nml/ min]**	**P [W]**	**η_U**	**η_I**	**η_E**
0	-	*8,92*	-	-	-	-	*0,73*	-	-
0,2	*0,21*	*8,09*	-	-	-	*1,70*	*0,66*	-	-
0,5	*0,51*	*7,58*	*48,0*	-	*75*	*3,87*	*0,62*	*0,48*	*0,30*
1,0	*1,01*	*7,12*	*66,0*	-	*110*	*7,66*	*0,58*	*0,63*	*0,37*
1,5	*1,51*	*6,83*	*75,0*	-	*130*	*7,86*	*0,55*	*0,78*	*0,43*
2,0	*2,03*	*6,64*	*92,0*	-	*175*	*13,48*	*0,54*	*0,81*	*0,44*
3,0	*3,02*	*6,34*	-	*47,0*	*230*	*19,15*	*0,52*	*0,90*	*0,47*
4,0	*4,00*	*6,10*	-	*60,0*	*300*	*24,40*	*0,50*	*0,94*	*0,47*
6,0	*6,00*	*5,64*	-	*80,5*	*430*	*33,84*	*0,46*	*0,97*	*0,45*
8,0	*8,01*	*5,20*	-	*99,5*	*570*	*41,65*	*0,42*	*0,97*	*0,41*
10,0	*10,0*	*4,79*	-	*117,0*	*720*	*47,90*	*0,39*	*0,97*	*0,38*
12,0	*12,02*	*4,34*	-	-	-	*52,17*	*0,35*	-	-

Tabelle 8.8: Messwerttabelle zum Vergleich Punkte maximaler Leistung und optimaler Wirkungsgrad

Auswertung:

1. Bestimmen Sie mit Hilfe des Durchfluss-Diagramms (Abbildung 12.5 im Anhang) aus der Position der Kugel und dem Systemdruck den Wasserstoff-Durchfluss in Nml/ min.
2. Berechnen Sie in jedem Messpunkt die Leistung der Brennstoffzelle.
$$P(I) = I * U(I)$$
3. Errechnen Sie den Spannungswirkungsgrad $\eta_U(I)$ der Brennstoffzelle bezogen auf die theoretische Gleichgewichtspannung der Wasserstoff-Sauerstoff-Reaktion.
$$\eta_U(I) = \frac{U(I)}{U_{ref}}$$
Als Referenzspannung U_{ref} wird die theoretische Gleichgewichtspannung mit 1,23 V/ Zelle eingesetzt.(vgl. Kapitel 4.3.2)
4. Bestimmen Sie den Strom- oder Faradaywirkungsgrad $\eta_I(I)$. Er ist das Verhältnis aus dem gemessenen Strom und dem, anhand des zugeführten Wasserstoff-Volumenstroms mit Hilfe des 1. Faradayschen Gesetzes berechneten, theoretisch möglichen Strom. Mit steigendem Strom nähert er sich dem Wert 1 an.
$$\eta_I(I) = \frac{I}{I_{th}}$$
$$I_{th} = \frac{\dot{V} * F * z}{V_m * n}$$

mit:

	V^*	*Wasserstoff-Volumenstrom in l/s*
	F	*Faraday-Konstante: 96.485 C/mol*
	z	*Anzahl der Elektronen je Teilchenumsatz der Reaktion: z = 2*
	V_m	*Molares Volumen bei 0 °C: 22,41410 l/mol*
	n	*Anzahl der Zellen im Stack: 10*

5. Berechnen Sie den Energiewirkungsgrad $\eta_E(I)$ aus dem Produkt aus Spannungs- und Stromwirkungsgrad.

$$\eta_E = \eta_U * \eta_I$$

6. Tragen Sie die errechneten Leistungen und die Energiewirkungsgrade in ein Wirkungsgrad-Leistungs-Strom-Diagramm ein.

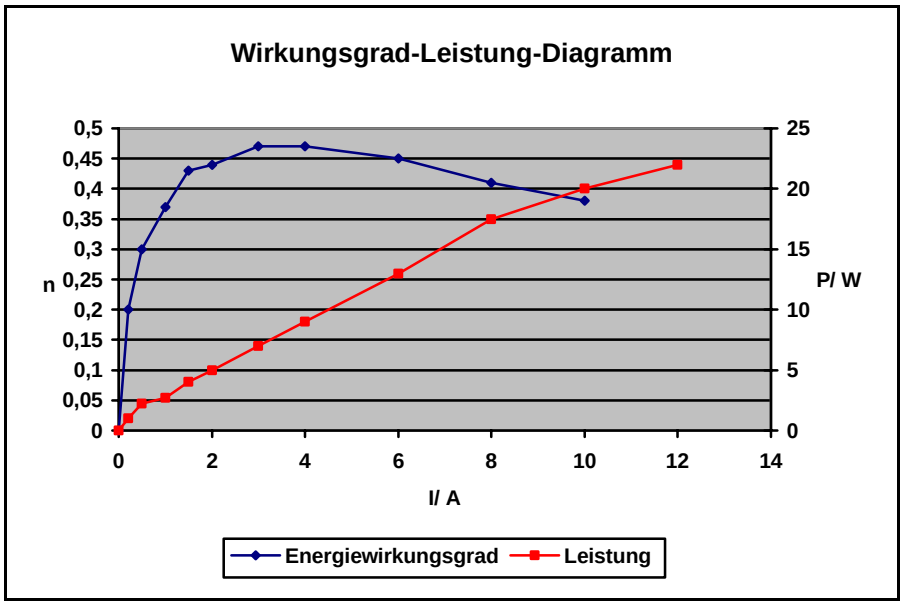

Abbildung 8.9: Wirkungsgrad- Leistungskurve des Brennstoffzellensystems

Interpretation:

Abbildung 8.9 zeigt, dass die Maxima der Leistung und des Wirkungsgrades bei unterschiedlichen Lastströmen zu finden sind. Dies hat zur Folge, dass die Wahl des Arbeitspunktes von der Zielsetzung im speziellen Anwendungsfall abhängig ist. Bei der Forderung nach maximaler Leistung muss ein geringerer Wirkungsgrad in Kauf genommen werden. Besteht die Forderung nach maximaler Energieeffizienz kann die Zelle nur im Teillastbetrieb gefahren werden. Zwischen den beiden Extrema muss ein, bezogen auf den Anwendungsfall, optimaler Arbeitspunkt gesucht werden.

8.7 Wechselbeziehung der Betriebsparameter einer Brennstoffzelle

Versuchsziel:
Mit dieser Versuchsanordnung wird die Wechselbeziehung zwischen den Betriebsparametern Innenwiderstand, Spannungswirkungsgrad und Stack-Temperatur erarbeitet. Die Spannung an den Lüftern des Stacks dient in diesem Fall dazu, die Parameter Innenwiderstand und Spannungswirkungsgrad zu variieren. Die Brennstoffzellen werden zunächst in einen stationären Zustand gebracht. Durch Veränderung der Lüfterspannung wird das stationäre Gleichgewicht aufgehoben und die Eigendynamik des Systems beobachtet.

Versuchsdurchführung:
1. Bauen Sie den Versuch nach Versuchsaufbau A1 (Abbildung 12.1 im Anhang) oder alternativ ohne Durchflussmesser und Sicherheitsventil nach Versuchsaufbau A2 (Abbildung 12.2 im Anhang) auf.
2. Fahren Sie das System unter Beachtung der gesonderten Hinweise ordnungsgemäß an.
3. Öffnen Sie vorsichtig das Spülventil am Stack für ca. 1 Sekunde um das System zu spülen (nur bei Dead-end-Betrieb).
4. Stellen Sie eine Lüfterspannung von 10 V ein.
5. Betreiben Sie das System im Dead-end-Betrieb oder im Durchflussbetrieb. Beachten Sie dabei die gesonderten Hinweise zu den Betriebsarten.
6. Integrieren Sie die elektronische Last in den Versuchsaufbau. Stellen Sie einen Laststrom von 6 A ein.
7. Nehmen Sie zu den angegebenen Zeiten die Werte für die Spannung und die Temperatur des Brennstoffzellenstacks auf.
8. Verringern Sie die Lüfterspannung nach 30 Minuten. Die Stromstärke bleibt mit 6 A unverändert.
9. Nehmen Sie zu den angegebenen Zeiten die Werte für die Spannung und die Temperatur auf.

$\Rightarrow$ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt.

Hinweis:
Bei der vorliegenden Stromstärke sollte das System im Abstand von 3 Minuten gespült werden.

Messwerttabelle:
Hinweis: Nehmen Sie die Spannungswerte bis auf 2 Kommastellen genau auf.

Systemdruck: 0,6 bar				
			Messungen	
Zeit T [min]	I [A]	Lüfter spannung [V]	U [V]	Temperatur T [°C]
0	6	10	5,64	27,0
1			5,82	29,5
3			5,92	31,0
5			6,05	32,0
10			6,02	33,0
15			5,90	33,5
20			5,98	34,0
25			5,95	34,0
30	6	2	6,03	35,0
31			6,10	35,0
33			6,26	36,0
35			6,58	38,0
45			6,62	45,0
50			5,23	50,0
55			4,12	55,0
60			-	-

Tabelle 8.9: Messwerttabelle zum Wechsel vom stationären zum dynamischen Zustand der Zellen

Auswertung:

1. Tragen Sie die gemessenen Werte in ein Spannung-Temperatur-Zeit-Diagramm ein.

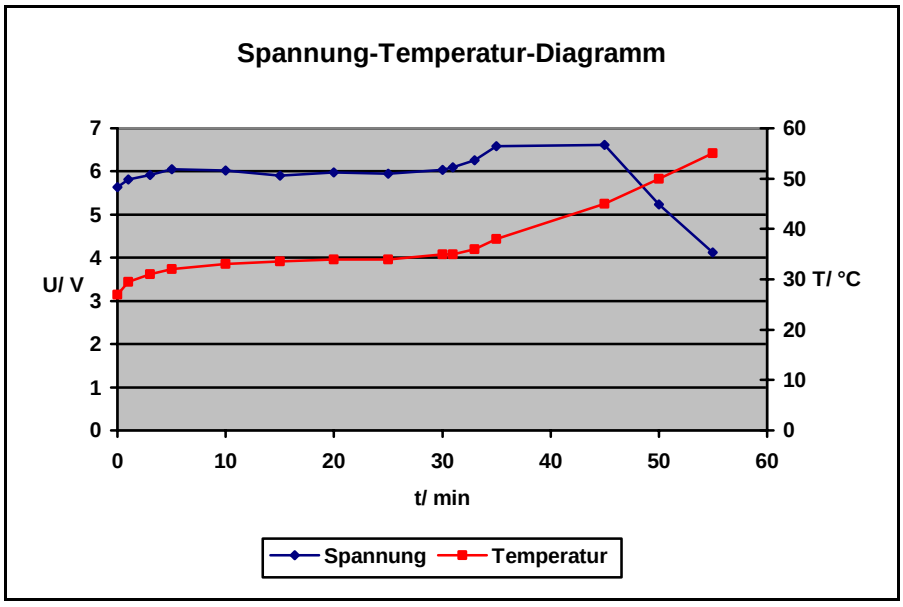

Abbildung 8.10: Spannung-Temperatur-Diagramm

Interpretation:
Infolge der unveränderten Strombelastung stellt sich in den ersten 30 Minuten ein konstanter Zustand im Stack ein. Dieser ist gekennzeichnet durch eine bestimmte Feuchtigkeit des Membranelektrolyten, die den Innenwiderstand und damit den Spannungswirkungsgrad des Stacks beeinflusst. Der Spannungswirkungsgrad legt die thermische Verlustleistung, die sich in der Zellentemperatur niederschlägt, des Stacks fest. Über die Dampfkurve von Wasser hat die Temperatur wiederum Einfluss auf die Feuchtigkeit der Membran. Bei Veränderung eines Betriebsparameters wird dieses Gleichgewicht gestört und ein neuer Zustand stellt sich ein.

Durch Verringerung der Lüfterspannung reduziert sich die Luftzufuhr des Stacks. Die Kühlung der Zellen wird gemindert und die Stack-Temperatur steigt. Dadurch reduziert sich wiederum der Wassergehalt der Membran, der Innenwiderstand des Stacks steigt und der Spannungswirkungsgrad nimmt ab. Diese Entwicklung hat eine Vergrößerung der thermischen Verlustleistung zur Folge. Die Temperatur des Stacks weiter steigt an und der Wassergehalt des Elektrolyten sinkt fortwährend.

Im Diagramm erkennt man, dass nach Verringerung der Lüfterspannung die Stackspannung kurzfristig steigt. Durch Verringerung der Luftzufuhr steigt der Wassergehalt des Elektrolyten zunächst an, da die Temperaturerhöhung des Stacks aufgrund der verminderten Kühlung träger verläuft. Die kontinuierlich steigende Zellentemperatur hat eine immer stärkere Austrocknung der Membran und einen Zusammenbruch der Stackspannung zur Folge.

8.8 Lastprofile und Nutzungsgrad

Versuchsziel:
In dieser Messaufgabe wird das Verhalten der Brennstoffzellen auf Lastwechsel demonstriert. Dazu wird dem System ein Lastprofil aufgeprägt und die Systemantwort messtechnisch erfasst. Im weiteren Schritt wird über die Nutzleistung bzw. -energie und die zugeführte Leistung bzw. Energie der Nutzungsgrad für ein Lastprofil bestimmt.

Versuchsdurchführung:
1. Bauen Sie den Versuch nach Versuchsaufbau A4 (Abbildung 12.4 im Anhang) auf.
2. Fahren Sie das System unter Beachtung der gesonderten Hinweise ordnungsgemäß an.
3. Öffnen Sie vorsichtig das Spülventil am Stack für ca. 1 Sekunde um das System zu spülen.
4. Stellen Sie eine Lüfterspannung von 6 V ein.
5. Betreiben Sie das System im Dead-end-Betrieb. Stellen Sie den gewünschten Systemdruck ein (empfohlener Mindestdruck 0,2 bar) und notieren ihn in der Tabelle. Beachten Sie die gesonderten Hinweise zu der Betriebsart.
6. Integrieren Sie die elektronische Last in den Versuchsaufbau. Stellen Sie mit der Widerstandslast einen Laststrom von 2 A ein. Warten Sie etwa 2 Minuten, bis sich der Strom und die Spannung annähernd stabilisiert haben. Verändern Sie den Strom dabei nicht sprunghaft, da in diesem Fall die Strömungsbedingungen so stark gestört werden, dass es einige Minuten dauern kann bis sich die Kugeln im Durchflussmesser wieder stabilisiert haben.
7. Fahren Sie das in der Messwerttabelle vorgegebenen Lastprofil durch, indem Sie zu den angegebenen Zeiten die Last von der Brennstoffzelle trennen bzw. wieder integrieren. Nehmen Sie für den jeweiligen Lastzustand die Werte für Strom, Spannung und Wasserstoff-Durchfluss auf. Anhand der Position der schwarzen Glaskugel und der metallischen Kugel im Durchflussmesser kann der Durchfluss bestimmt werden. Die schwarze Glaskugel ist zur Messung kleiner, die metallische Stahlkugel zur Erfassung großer Durchflüsse vorgesehen. Verwenden Sie die Stahlkugel, wenn diese beginnt ruhig zu schweben, damit eine höhere Messgenauigkeit erzielt wird. Maßgeblich bei der Ablesung ist die Mitte der Kugel.
8. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Temperatur über 45 °C steigt.

Messwerttabelle:
Hinweis: Nehmen Sie die Strom- und Spannungswerte bis auf 2 Kommastellen und den Wasserstoff-Durchfluss bis auf einen ½ Teilstrich genau auf.

Systemdruck: 0,6 bar									
Lüfterspannung: 6 V									
Zeit	**Aktion**	**Last zustand**	**Messwerte**				**Berechnungen**		
T [min]		**I [A]**	**I [A]**	**U [V]**	**Kugel position Glas [mm]**	**Kugel position Stahl [mm]**	**V^*_{H2} [Nml/ min]**	**P_{nutz} [W]**	**P_{zu} [W]**
0	**Last trennen**	**0**	*0*	*8,18*	-	-	-	-	*2,3*
1	**Werte aufnehmen**	**0**	*0*	*8,95*	-	-	-	-	*2,3*
2	**Last zuschalten**	**2**	*2,02*	*6,66*	*92,5*	*35,0*	*175*	*13,45*	*31,48*
10	**Werte aufnehmen**	**2**	*2,02*	*6,66*	*92,5*	*35,0*	*175*	*13,45*	*31,48*
17	**Last trennen**	**0**	*0*	*8,21*	-	-	-	-	*2,3*
18	**Werte aufnehmen**	**0**	*0*	*8,21*	-	-	-	-	*2,3*
19	**Ende der Messung**	**0**	*0*	-	-	-	-	-	*2,3*

Tabelle 8.10: Messwerttabelle des Lastprofils zur Bestimmung der Systemantwort

Auswertung:

1. Bestimmen Sie mit Hilfe des Durchfluss-Diagramms (Abbildung 12.5 im Anhang) aus der Position der Kugel und dem Systemdruck den Wasserstoff-Durchfluss in Nml/ min.
2. Zeichnen Sie ein Lastprofil. Nehmen Sie die am Anfang eines Zeitraums aufgenommen Werte für den Laststrom als konstant für den jeweiligen Zeitbereich an.
3. Berechnen Sie die abgegeben Nutzleistung für die einzelnen Lastzustände.

$$P_{Nutz,i} = U_i * I_{Last,i}$$

4. Tragen Sie die Nutzleistung in das Lastprofil-Diagramm ein.
5. Berechnen Sie für jeden Lastzustand die aufgewendete Leistung aus den theoretischen Werten für Spannung und Strom.

$$P_{zu,i} = U_{th,i} * I_{th,i}$$

Die theoretische Spannung wird auf den unteren Heizwert bezogen und wird mit 1,254 V/ Zelle angegeben. Der theoretisch mögliche Strom errechnet sich aus:

$$I_{th} = \frac{\dot{V} * F * z}{V_m * n}$$

mit:

	V^*	*Wasserstoff-Volumenstrom in l/s*
	F	*Faraday-Konstante: 96.485 C/mol*
	z	*Anzahl der Elektronen je Teilchenumsatz der Reaktion: z = 2*
	V_m	*Molares Volumen bei 0 °C: 22,41410 l/mol*
	n	*Anzahl der Zellen im Stack: 10*

6. Tragen Sie die aufgewendete Leistung in das Lastprofil-Diagramm ein.
7. Bestimmen Sie den Nutzungsgrad NG des Systems für das vorliegende Lastprofil.

$$NG = \frac{W_{nutz}}{W_{zu}}$$

$$NG = \frac{\sum_i (P_{nutz,i} * \Delta t_i)}{\sum_i (P_{zu,i} * \Delta t_i)}$$

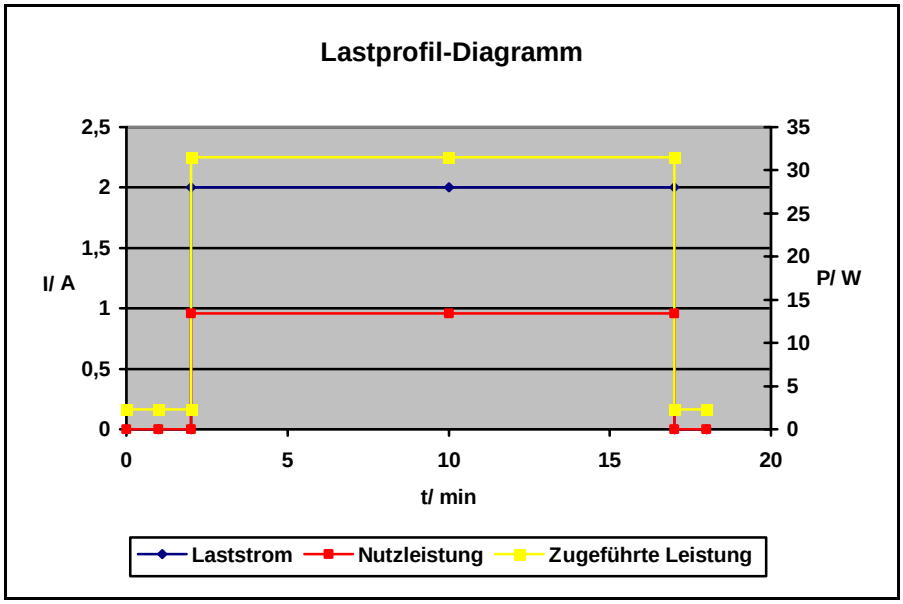

Abbildung 8.11: Lastprofil-Diagramm

Interpretation:

Abbildung 8.11 verdeutlicht einen der Vorzüge der PEM-Brennstoffzellen. Der Zellstapel ist in der Lage, schnellen Lastwechseln problemlos zu folgen. Weiterhin wird in dem Diagramm das Verhältnis von Nutzleistung zur zugeführten Leistung deutlich. Betrachtet man die Leistungen über die Zeit, erhält man die jeweiligen Energien. Das Verhältnis der Nutzenergie zur zugeführten Energie bezeichnet man als Nutzungsgrad. Der Nutzungsgrad für das vorliegende Lastprofil beträgt etwa 43 %.

8.9 Systemantwort auf Lastwechsel

Versuchsziel:
Das gute Lastwechselverhalten von PEM-Brennstoffzellen ist das Thema dieser Messanordnung. Ein vorgegebenes Lastprofil mit unterschiedlichen Stromsprüngen wird durchgefahren und die Anpassung der Stack-Spannung an den neuen Zustand messtechnisch aufgenommen. Aus der graphischen Darstellung der Parameter kann die Zeitkonstante für die Sprungantwort ermittelt werden und das Lastverhalten der Zellen beurteilt werden.

Versuchsdurchführung:
1. Bauen Sie den Versuch nach Versuchsaufbau A1 (Abbildung 12.1 im Anhang) auf.
2. Fahren Sie das System unter Beachtung der gesonderten Hinweise ordnungsgemäß an.
3. Öffnen Sie vorsichtig das Spülventil am Stack für ca. 1 Sekunde um das System zu spülen.
4. Stellen Sie eine Lüfterspannung von 6 V ein.
5. Betreiben Sie das System im Dead-end-Betrieb. Stellen Sie den gewünschten Systemdruck ein (empfohlener Mindestdruck 0,2 bar) und notieren ihn in der Tabelle. Beachten Sie die gesonderten Hinweise zu der Betriebsart.
6. Integrieren Sie die elektronische Last in den Versuchsaufbau. Stellen Sie an der Widerstandslast einen Laststrom von 2 A ein und speichern Sie diesen Wert (genaue Erläuterung zur Speicherung der Einstellung in [euro,00]). Stellen Sie anschließend einen Lastrom von 6 A an der elektronischen Last ein und trennen Sie diese wieder vom System. Warten Sie nach jeder Einstellung des Laststromes etwa 2 Minuten, bis sich der Strom und die Spannung annähernd stabilisiert haben. Verändern Sie den Strom dabei nicht sprunghaft, da in diesem Fall die Strömungsbedingungen so stark gestört werden, dass es einige Minuten dauern kann bis sich die Kugeln im Durchflussmesser wieder stabilisiert haben.
7. Fahren Sie die in der Messwerttabelle vorgegebenen Lastwechsel durch, indem Sie zu den angegebenen Zeiten die Last in den Aufbau integrieren und zwischen den beiden voreingestellten Lastströmen wechseln. Nehmen Sie für den jeweiligen Lastzustand den Wert der Stackspannung auf.
8. Trennen Sie die Last von der Brennstoffzelle.

⇒ Die Messung ist abzubrechen, wenn die Spannung des Stacks unter 4,0 V sinkt oder die Temperatur über 45 °C steigt.

Messwerttabelle:
Hinweis: Nehmen Sie die Strom- und Spannungswerte bis auf 2 Kommastellen genau auf.

Zeit	Aktion	Lastzustand	Messwerte
T [s]		**I [A]**	**U [V]**
-60		**2**	*6,92*
0	**Umschalten auf 6 A**		*5,61*
1		**6**	*5,66*
5		**6**	*5,7*
10		**6**	*5,75*
15		**6**	*5,77*
20		**6**	*5,79*
25		**6**	*5,81*
30		**6**	*5,83*
35		**6**	*5,85*
40		**6**	*5,86*
45		**6**	*5,87*
50		**6**	*5,88*
55		**6**	*5,89*
60	**Umschalten auf 2 A**		*7,25*
61		**2**	*7,15*
65		**2**	*7,10*
70		**2**	*7,05*
75		**2**	*7,03*
80		**2**	*7,00*
85		**2**	*6,97*
90		**2**	*6,96*
100		**2**	*6,95*
105		**2**	*6,94*
110		**2**	*6,94*
115		**2**	*6,94*

Tabelle 8.11: Lastprofil zur Ermittlung der Sprungantwort

Auswertung:

1. Tragen Sie die Werte für den Laststrom und die Stackspannung über die Zeit in ein Sprungantwort-Diagramm ein.
2. Bestimmen Sie aus dem Diagramm die Zeitkonstante der Sprungantwort.

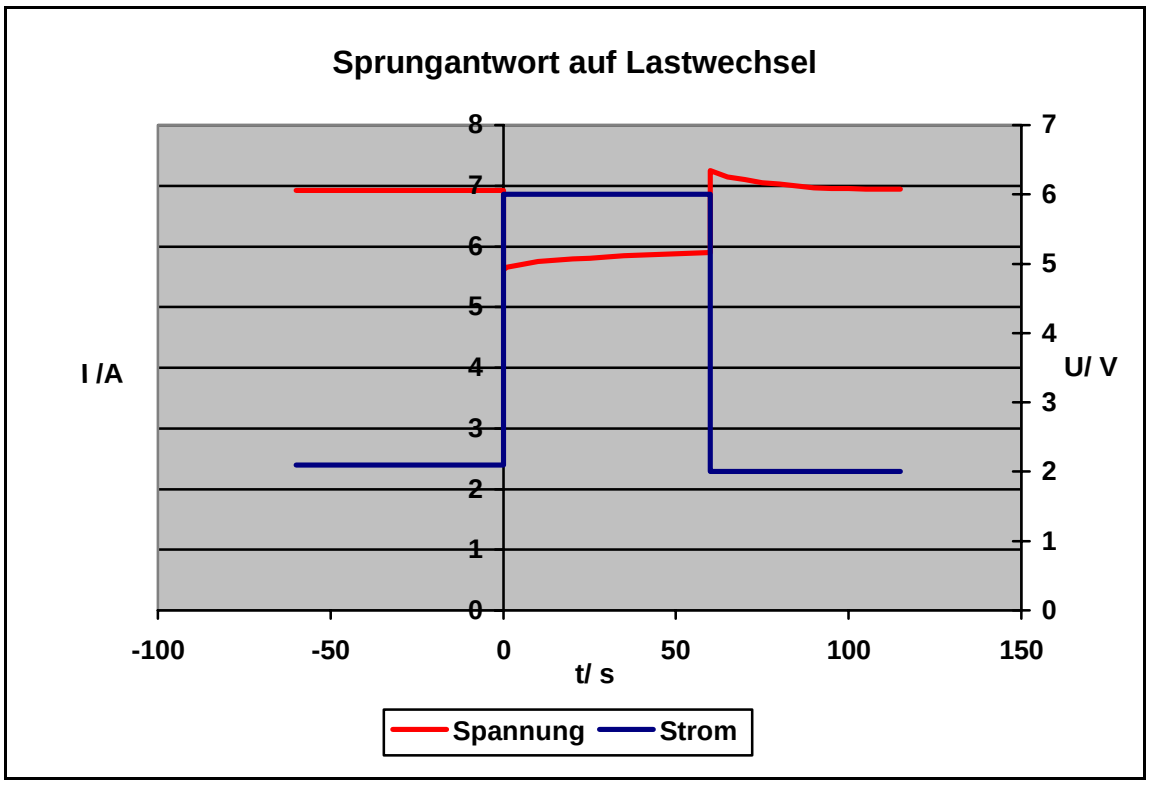

Abbildung 8.12: Sprungantwort auf Lastwechsel

Interpretation:
Bei sprunghafter Änderung des Laststromes ist eine charakteristische Antwort der Stackspannung zu erkennen. Die Dauer bis zum Erreichen eines stationären Zustandes für die Spannung wird als Zeitkonstante bezeichnet. Im gezeigten Beispiel beträgt die Anpassung an den neuen Zustand rund 40 Sekunden.

9 Entwurf zur Präsentation und Kommunikation

Nachdem in dieser Arbeit die ausbildungsorientierte Anwendung des Experimentiersystems ausführlich erarbeitet wurde, soll in diesem Abschnitt ein Entwurf eines Präsentationsmodells und ein mögliches Kommunikationskonzept vorgestellt werden. Die folgenden Ideen können als Grundlage für eine Folgearbeit dienen, verstehen sich aber nicht als verbindliche Umsetzungsvariante.

Zielsetzung:
Das Präsentationsmodell soll allen beteiligten Projektpartnern auf Messen, Energietagen, Fachtagungen, Kongressen etc. zur Veranschaulichung neuer Energiekonzepte und nicht zuletzt als Anziehungspunkt (Eye-Catcher) für den Ausstellungsbereich dienen. Dazu sollte das Präsentationsmodell ein professionelles Erscheinungsbild abgeben und für den Betrachter ein hohes Maß an Attraktivität aufweisen. Die Attraktivität erhält das Ausstellungsstück dadurch, dass die Präsentation der Technologie auf die anzusprechende Zielgruppe zugeschnitten ist. Ziel ist es, eine möglichst hohe Identifikation des Kunden mit dem dargestellten Anwendungsfall zu erreichen. Im Fall der beteiligten Energiedienstleister können zwei Zielgruppen definiert werden:

- Geschäftskunden
- Private Kunden

Umgestaltung des Modells zur Präsentation:
Um das Präsentationsmodell problemlos an die jeweilige Zielgruppe anpassen zu können sollte ein modularer Aufbau gewählt werden. Dies erleichtert zudem den Umbauaufwand vom Ausbildungs- zum Präsentationssystem. Die folgenden vier Einzelmodule würden eine zielgruppenspezifische Präsentation erlauben:

- Energieumwandlungsmodul
  In diesem Baustein sollte die Brennstoffzelle sowie die Wasserstoffversorgungselemente untergebracht werden. Die PEM-Brennstoffzelle ist das dominierende Bauteil und steht optisch im Vordergrund.

- Steuerungs- und Messmodul
  Im Steuerungs- und Messmodul können die zum Betrieb notwendigen Elemente wie z.B. die Lüftersteuerung untergebracht werden. Weiterhin ist es sinnvoll einfache Messelemente zur optischen Darstellung von Spannung, Strom, Leistung und Temperatur der Zelle zu integrieren. Mit den Messeinrichtungen können technische Fragen des Publikums unter Hinzuziehung konkreter Arbeitspunkte und Parameter beantwortet werden. Weiterhin dienen die Anzeigen zur Überwachung des Betriebszustandes des Präsentationsmodells.

- Energienutzungsmodul für Geschäftskunden
  Für die Zielgruppe der Geschäftskunden ist ein Modul zu entwickeln, welches die Haupteinsatzfelder von Energie im industriellen Bereich wiederspiegelt. Der Schwerpunkt in diesem Bereich liegt in der Erzeugung von mechanischer Energie und in der Bereitstellung von Wärmeenergie für die Prozesstechnik und die Raumheizung. Idealerweise könnte ein aussagekräftiger Produktionsprozess wie z.B. die Herstellung von Kunststoffprodukten nachgebildet werden.

- Energienutzungsmodul für Privatkunden
  Die Zielgruppe der Privatkunden ist vornehmlich an die Substitution der herkömmlichen Heizungsanlage zur Erzeugung von Warmwasser und Raumwärme interessiert. Die Produktion von Strom mittels Brennstoffzellen ist in diesem Bereich ein willkommener Nebeneffekt um die Anlage wirtschaftlicher betreiben zu können. Das Hauptaugenmerk sollte auf die Wärmeauskopplung aus dem System liegen. Diese könnte durch Wasserkreisläufe mit eingefärbten Wasser (rot = warm, blau = kalt) und elektrischen Pumpen nachgebildet werden. Die Nutzung der elektrischen Energie sollte durch aussagekräftige Verbraucher aus dem Bereich der Beleuchtungstechnik und Kommunikation dargestellt werden. In Bereich der Privatkunden bietet sich weiterhin an, die Anbindung der einzelnen Anlagen an ein zentrales EVU durch spezielle Leittechnik zu simulieren. Dadurch könnte die mögliche Entwicklung zu virtuellen Kraftwerken zum Ausgleich von Leistungsspitzen im Netzverbund nachgebildet werden.

Äußere Erscheinungsform:
Die einzelnen Module könnten in einem offenen dreidimensionalen Korpus aus Leisten mit entsprechenden Führungsnuten untergebracht werden. Eine offen gehaltene Form lässt Einblicke aus mehreren Betrachtungswinkeln zu. Um eine optische Trennung der einzelnen Module zu erreichen, könnten diese auf verschiedene Ebenen des Korpus verteilt werden. Neben den Energienutzungsmodulen sollte auch die äußere Erscheinungsform des Präsentationsmodells an die jeweilige Zielgruppe angepasst werden können. Dazu können weitere Bauteile an die Seiten des zunächst neutralen Korpus angebracht werden. Mit einem roten Hausdach könnte ein Einfamilienhaus dargestellt werden oder das Anbringen eines Schornsteins lässt die Assoziation zu einem Fabrikgebäude zu.

Kommunikation:
Zur Kommunikation der Inhalte ist eine Darstellung der technischen Grundlagen und der Anwendungsfelder spezifisch für jede Zielgruppe vorzusehen. Jeweils ein Plakat auf einer Stellwand könnte das eigentliche Präsentationsmodell einrahmen. Zur weitergehenden Vertiefung des Wissens und um eine spätere Kontaktaufnahme zu ermöglichen, sollte ein Flyer entworfen werden. In diesem Flyer können die gezeigten Inhalte nochmals kurz vermittelt werden. Für den Betreuer des Modells ist ein Leitfaden mit dem komprimierten Wissen zur Brennstoffzellen-Technologie sinnvoll, um konkrete, tiefergehende Fragen beantworten zu können.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit liefert den Grundstein für eine Implementierung der Brennstoffzellen-Technologie in die Ingenieurausbildung an der Fachhochschule Bielefeld. Das erarbeitete Wissen kann im Fachbereich Elektrotechnik, besonders im Hinblick auf die Studienrichtung Regenerative Energien, als auch im Fachbereich Maschinenbau Anwendung finden.

Die vorliegende Arbeit setzt die ausbildungsorientierte Anwendung des Brennstoffzellen-Modells um. Im ersten Teil der Arbeit werden Grundlagen zum Energieträger Wasserstoff und eine Charakterisierung der heutigen Wasserstoffwirtschaft erarbeitet. Der Stand der derzeitigen Brennstoffzellen-Technologie insbesondere die PEM-Brennstoffzelle wird vorgestellt. Im anschließenden praktisch geprägten Teil der Arbeit wurde eine Marktanalyse im Bereich Brennstoffzellentechnik durchgeführt, ein Konzept für ein Experimentiersystem entwickelt und die Umsetzung des Konzeptes betreut. Zur Untermauerung der theoretischen Kenntnisse werden praktische Messungen an einem Versuchsstand demonstriert, die problemlos auf die praktische Ausbildung von Ingenieuren an der FH Bielefeld in Form von Praktika projiziert werden können. Ein Entwurf zur Umsetzung des Präsentationsmodells und dessen Kommunikation wird am Ende dieser Arbeit vorgestellt. Die Gestaltung des Präsentationsaufbaus und die Kommunikation der Inhalte werden Bestandteil einer Folgearbeit sein.

Das Brennstoffzellen-Modell soll im ersten Entwicklungsschritt den Kernbereich einer Wasserstoff-Energiewirtschaft veranschaulichen. Die Anordnung umfasst die Teilsysteme der Energiespeicherung, der Energiewandlung und der Energieanwendung einer vom Wasserstoff geprägten Energiewirtschaft. Durch eine Erweiterung der Anordnung um den Bereich der Energieerzeugung aus regenerativen Energien kann der geschlossene Kreislauf einer solaren Wasserstoffwirtschaft (vgl. Kapitel 3.8) modellhaft dargestellt werden. Dazu könnte die durch Windkraftanlagen oder Photovoltaikmodule erzeugte elektrische Energie mittels eines Elektrolyseurs den für die Experimentieranordnung notwendigen Wasserstoff produzieren.

Die mögliche Bedeutung des Wasserstoffs in der Energieversorgung der Zukunft hängt stark von der strategischen Ausrichtung der Energieversorgung ab. Auf dem Weg von der fossilen CO_2-Energiewirtschaft zur CO_2-freien solaren Energiewirtschaft kann der Wasserstoff seine Eigenschaften als Sekundärenergieträger ausspielen. Im Verbund mit regenerativen Energien kommt dem Wasserstoff eine strategische Bedeutung als Energiespeicher, Transportmedium und schadstofffreier mobiler Energieträger zu. Auch der mobile Einsatz von Wasserstoff in Verkehrsanwendungen bietet ein enormes Entwicklungspotenzial. Eine Marktdurchdringung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik erscheint allerdings nur möglich, wenn die technische Entwicklung der Energiekonzepte weit genug fortgeschritten ist. Als Multiplikator bei der Einführung neuer Technologien erweist sich die Akzeptanz der Menschen, vor allem die Offenheit von Fachleuten neuen Technologien gegenüber. Diese ist nur bei ausreichendem Wissen um diese Technik zu erzielen. Mit dieser Arbeit ist ein erster Schritt zu einem Wissens-Transfer zu späteren Ingenieuren getan. Allerdings bedarf es noch vieler weiterer Schritte und Entwicklungsarbeit um diese sehr zukunftsträchtige und aussichtsreiche Technologie ökonomische und ökologisch zu etablieren.

11 Literatur

[bine,99] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): PEM-Brennstoffzellen, BINE Projekt Info-Service, BINE Informationsdienst, Bonn, 1999

[birol,99] Birol, F., Keppler, J.-H.: IEA-Weltenergieprognose 1998, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 49. Jg., Heft 10, S. 651 ff., Paris, 1999

[bmft,88] BMFT: Solare Wasserstoffenergiewirtschaft, Ad-hoc-Ausschuss beim Bundesminister für Forschung und Technologie, Gutachten und wissenschaftliche Beiträge, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, 1988

[bmwi,99] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.), Referat Öffentlichkeitsarbeit: Energiedaten 1999 -Nationale und internationale Entwicklung-, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Bonn, 1999

[cholo,99] Cholodetzky, R., Snieders, J. : Dezentrale Energiewandler, Kapitel 5: Brennstoffzelle, Studienarbeit FH Bielefeld, Bielefeld, 1999

[czak,99] Czakainski, M.: Bevölkerungswachstum und globaler Energieverbrauch und Energiesituation in den Schwellen- und Entwicklungsländern, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 49. Jg., Heft 10, S. 646 ff., Essen, 1999

[daimler,00] Daimler-Chrysler: Auszüge aus dem Internetauftritt www.daimlerchrysler.de, Daimler-Chrysler, Stuttgart, 2000

[dlr,00] DLR: Niedertemperatur-Brennstoffzellen PEFC und DMFC, Infobroschüre, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart, 2000

[dwv,0100] Deutscher Wasserstoffverband DWV: Wasserstoff-Spiegel – Neues vom Wasserstoff, Ausgabe Nr. 1/00, Deutscher Wasserstoffverband, Berlin, 2000

[dwv,0100] Deutscher Wasserstoffverband DWV: Wasserstoff-Spiegel – Neues vom Wasserstoff, Ausgabe Nr. 1/00, Deutscher Wasserstoffverband, Berlin, 2000

[dwv,02/00] Deutscher Wasserstoffverband DWV: Wasserstoff-Spiegel – Neues vom Wasserstoff, Ausgabe Nr. 7/97, Deutscher Wasserstoffverband, Berlin, 1997

[dwv,0499] Deutscher Wasserstoffverband DWV: Wasserstoff-Spiegel – Neues vom Wasserstoff, Ausgabe Nr. 04/99, Deutscher Wasserstoffverband, Berlin, 1999

[dwv,0499] Deutscher Wasserstoffverband DWV: Wasserstoff-Spiegel – Neues vom Wasserstoff, Ausgabe Nr. 04/99, Deutscher Wasserstoffverband, Berlin, 1999

[dwv,0597] Deutscher Wasserstoffverband DWV: Wasserstoff-Spiegel – Neues vom Wasserstoff, Ausgabe Nr. 5/97, Deutscher Wasserstoffverband, Berlin, 1997

[euro,00] Eurotest Systemelektronik GmbH: Bedienungsanleitung Elektronische Last ELP/ SL 100, Eurotest Systemelektronik GmbH, Altlußheim, 2000

[fette,96] Fette, M., Schwarze, R.,Voß, J. (Hrsg.): Energieversorgung der Zukunft, vde-Verlag, Berlin/ Offenbach, 1996

[fhg,00] Frauenhofer Gesellschaft für solare Energiesysteme: Auszüge aus dem Internetauftritt www.fhg.de, 2000

[franz, 98] Franz: Vorlesungsscript Dezentrale Energieversorgung – Wasserstoff-technik, FH Bielefeld, 1998

[gfe,00] GfE Metalle und Materialien GmbH: Produktinformationen über die Metallhydridtechnologie, GfE Metalle und Materialien GmbH, Nürnberg, 2000

[heim,99] Heiming, A., Uhrig, M., Kraus, P., Elektrochemische Energiewandler (Brennstoffzelle), in: Der Energieberater, 32. Erg.-Lfg., Bd.2, Kap. 5.8, Deutscher Wirtschaftsverlag, Köln, 1999

[hein,96] Heinloth, K.: Energie und Umwelt -Klimaverträgliche Nutzung von Energie-, Teubner Verlag, Stuttgart, 1996

[helio,00] Heliocentris Energiesysteme GmbH: Bedienungsanleitung Mess- und Kontrolleinheit HC 50, Heliocentris Energiesysteme GmbH, Berlin, 2000

[helio1,99] Helicentris Energiesysteme GmbH: Experimentieranleitung für Brennstoffzellensystem NP 20 und NP 50, Heliocentris Energiesysteme GmbH, Berlin, 1999

[helio2,99] Heliocentris Energiesysteme GmbH: Bedienungsanleitung Brennstoffzellenstack NP 50, Heliocentris Energiesysteme GmbH, Berlin, 1999

[h-tec,00] H-TEC Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH: Produktinformationen, Lübeck, 2000

[kuch,96] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik, 16. Auflage, Verbuchverlag Leipzig, Leipzig, 1996

[ledjeff,95] Ledjeff, K. (Hrsg.): Brennstoffzellen – Entwicklung, Technologie, Anwendung -, C.F. Müller, Heidelberg, 1995

[leusch,99] Leuschner, U.: Brennstoffzellen, Strombasiswissen Nr. 131, Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft e.V., Frankfurt, 1999

[linde1,00] Linde AG, Werksgruppe Technische Gase: Druckschrift Wasserstoff, Höllriegelskreuth, 2000

[linde2,00] Linde AG, Werksgruppe Technische Gase: Katalog Spezialgase, Höllriegelskreuth, 2000

[meliß,97] Meliß, M.: Regenerative Energiequellen –Praktikum-, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1997

[nrw,00] Energieangentur NRW (Hrsg.): Brennstoffzellen – Entwicklungsstand, Einsatzbereiche und Marktanforderung, Energieagentur NRW, Wuppertal, 2000

[nrw,99] Energieagentur NRW (Hrsg.): Brennstoffzellen – Technologie für das 21. Jahrhundert?, Dokumentation der Fachtagung vom 28. Oktober 1999, Energieagnetur NRW, Wuppertal, 1999

[oertel,97] Oertel, D.: Monitoring: Zum Entwicklungsstand der Brennstoffzellen-Technologie, Sachstandsbericht Nr. 51, TAB Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Bonn, 1997

[phywe,00] PHYWE Systeme GmbH: Produktinformationen, Göttingen, 2000

[schiffer,00] Schiffer, H.-W.: Deutscher Energiemarkt `99, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 50. Jg., Heft 3, S. 114 ff., Köln, 2000

[schiffer,99] Schiffer, H.-W.: Praxiswissen aktuell -Energiemarkt Deutschland-, TÜV-Verlag, Köln, 1999

[schlessing,00] Schlesinger, M., Schulz, B. und W.: Deutscher Energiemarkt 2020, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 50. Jg., Heft 3, S. 106 ff., Köln, 2000

[schmidt,97] Schmidtchen, U.: Auf dem Weg zur Wasserstoffenergie – Wie kommen wir weiter?, Tagungsbericht vom 12. und 13. Dezember 1995, Bundesamt für Materialforschung, Berlin, 1997

[schmidt1,00] Schmidtchen, U.: DWV-Information Nr. 4 vom 18. Januar 2000, Häufige Fragen zum Wasserstoff, Deutscher Wasserstoffverband e.V., Berlin, 2000

[schmidt2,00] Schmidtchen, U.: DWV-Information Nr. 4 vom 18. Januar 2000, Wozu eigentlich Wasserstoff?, Deutscher Wasserstoffverband e.V., Berlin, 2000

[schmidt3,00] Schmidtchen, U.: DWV-Information Nr. 4 vom 18. Januar 2000, Wissen und Unwissen über Wasserstoff, Deutscher Wasserstoffverband e.V., Berlin, 2000

[schwarze,99] Schwarze, R.: Vorlesungsscript Energiewirtschaft und –recht, FH Bielefeld, 1999

[stadt,99] Stadtwerke Bielefeld GmbH: Energie für das neue Jahrtausend, Infobroschüre zur Hochtemperatur-Brennstoffzelle, Stadtwerke Bielefeld GmbH, Bielefeld, 1999

[strup,00] Strupeit, L.: Perspektiven der Brennstoffzelle in der Hausenergie-versorgung, Studienarbeit FH Bielefeld, Bielefeld, 2000

[sulzer,00] Sulzer Hexis: Auszüge aus dem Internetauftritt www.hexis.com, Sulzer Hexis AG , Winterthur CH, 2000

[vaillant,00] Vaillant: Auszüge aus dem Internetauftritt www.vaillant.de, Vaillant , Remscheid, 2000

[vdew,99] Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke: Brennstoffzellen – Eine Option für EVU ?, VDEW, Frankfurt, 1999

[wa-tec] WA-TEC Ingenieurbüro Martin Strippel: Produktinformationen, Darmstadt, 2000

[weber,91] Weber, R.: Der sauberste Brennstoff –Der Weg zur Wasserstoff-Wirtschaft-, Olynthus Verlag, Oberbözberg, 1991

[winter,89] Winter, C.-J., Nitsch, J. (Hrsg.): Wasserstoff als Energieträger: Technik, Systeme, Wirtschaft, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1989

[winter,97] Winter, C.-J.: Sonnenenergie nutzen –Technik, Wirtschaft, Umwelt, Klima, Forum für Zukunftsenergien, VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1997

[wurster,97] Wurster, R.: Wasserstoffspeicher und Brennstoffzellensysteme für dezentralen stationären und mobilen Einsatz, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, 1997

[wurster,98] Wurster, R.: Technologie und mögliche Anwendung der Brennstoff-zelle, Deutsche Kälte-Klima-Tagung 1998, L-B-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, 1998

[zittel,96] Zittel, W., Wurster, R.: Wasserstoff in der Energiewirtschaft, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, 1996

[zittel,98] Zittel, W., Wurster, R.: Wasserstoff, in: Der Energieberater, 26. Erg.-Lfg., Bd.2, Kap. 6.11, Deutscher Wirtschaftsverlag, Köln, 1998

[zsw,00] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung: Produktinformationen, Ulm, 2000

12 Anhang

12.1 Versuchsaufbau A 1

Benötigte Komponenten:
- Brennstoffzellenstack
- Elektronische Last
- Wasserstoffversorgung mit Druckminderer
- Durchflussmesser
- Lüfterstromversorgung
- Strommessgerät
- Spannungsmessgerät
- Temperaturmessgerät

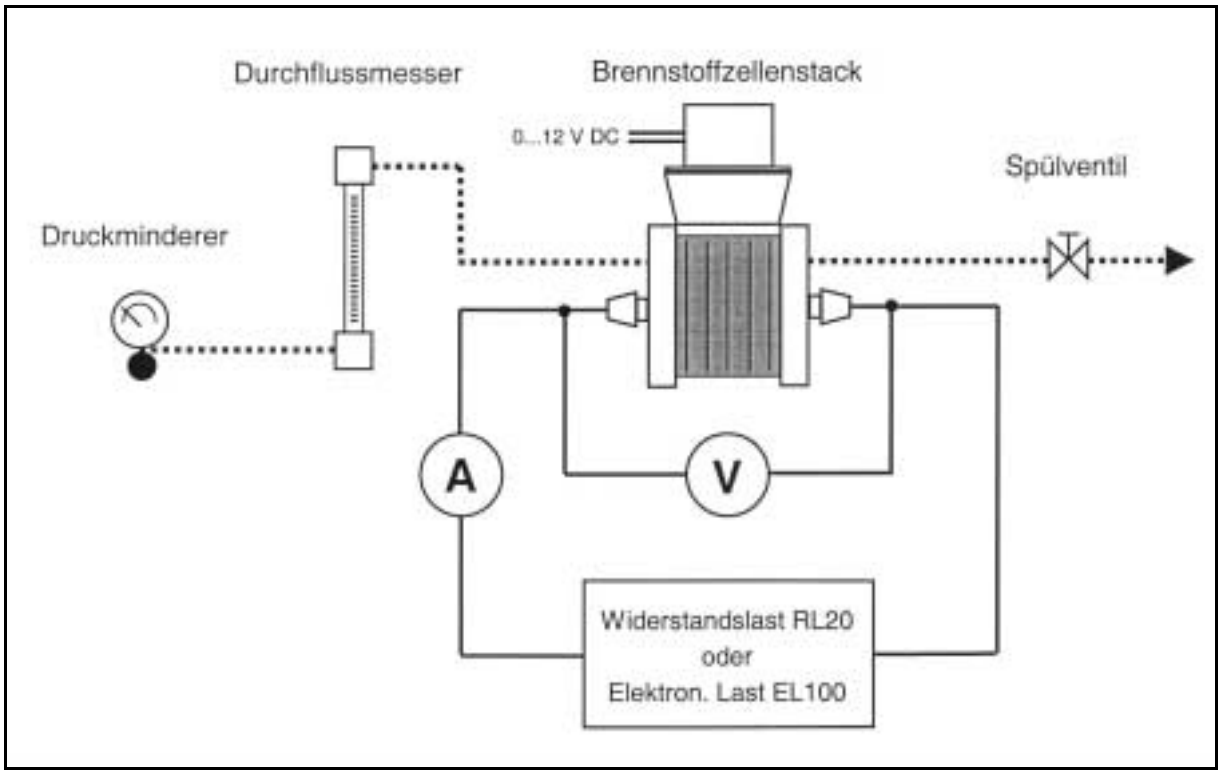

Abbildung 12.1: Versuchsaufbau A1 [helio1,99]

12.2 Versuchsaufbau A 2

Benötigte Komponenten:
- Brennstoffzellenstack
- Elektronische Last
- Wasserstoffversorgung mit Druckminderer
- Lüfterstromversorgung
- Strommessgerät
- Spannungsmessgerät
- Temperaturmessgerät

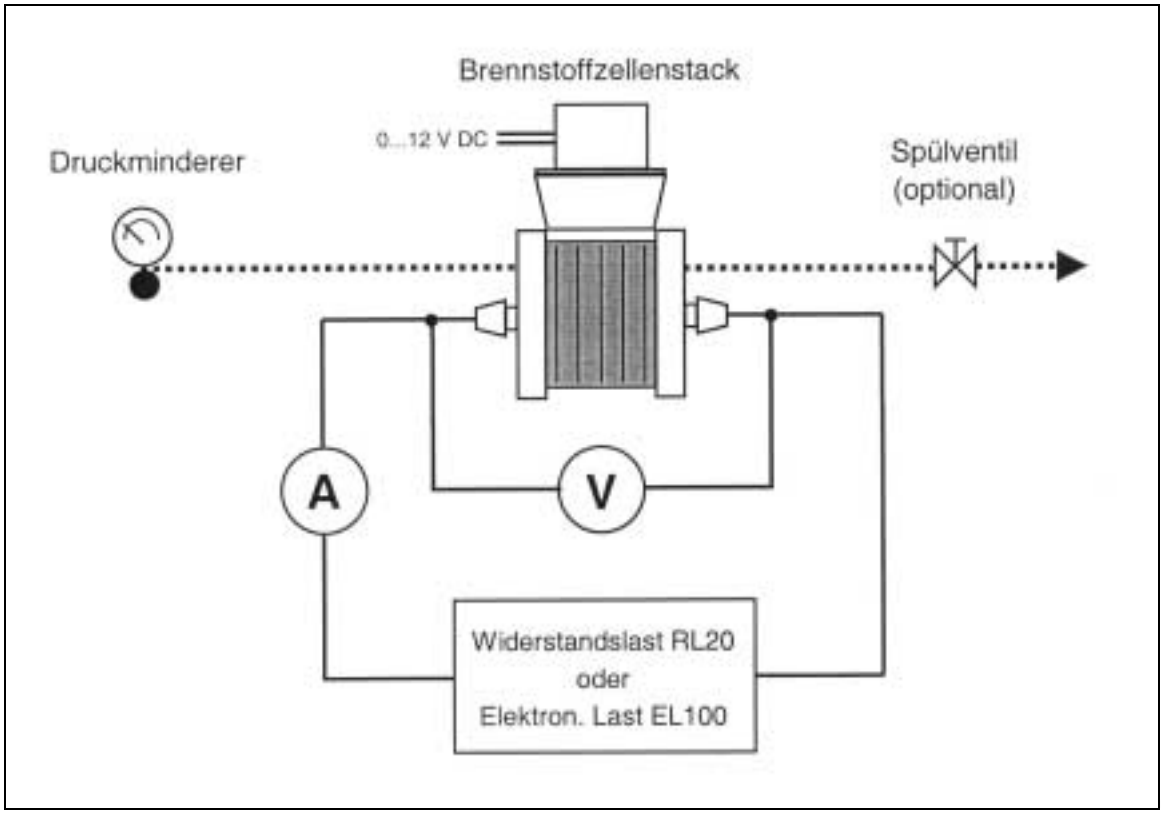

Abbildung 12.2: Versuchsaufbau A 2 [helio1,99]

12.3 Versuchsaufbau A 3

Benötigte Komponenten:

- Brennstoffzellenstack
- Elektronische Last
- Wasserstoffversorgung mit Druckminderer
- Lüfterstromversorgung
- Strommessgerät
- Spannungsmessgerät
- Temperaturmessgerät
- Leistungswiderstand 0,05 Ohm/ 25 Watt

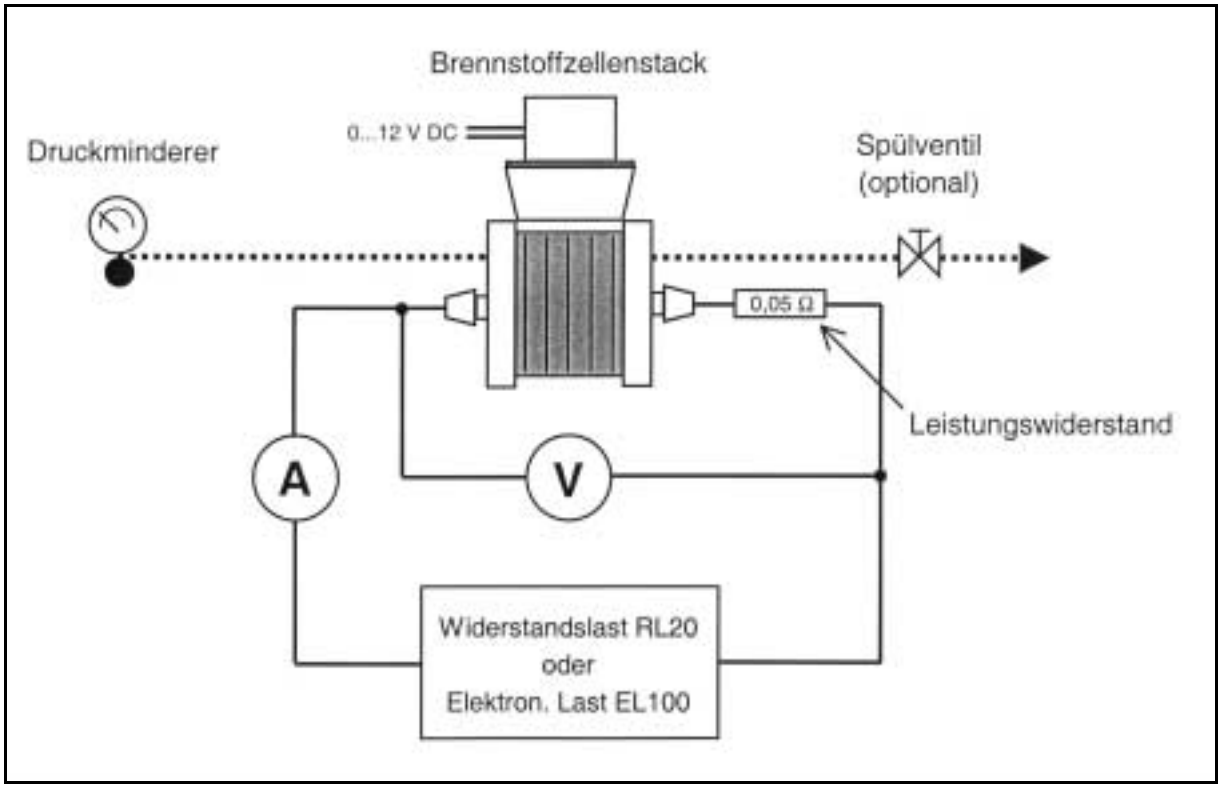

Abbildung 12.3: Versuchsaufbau A 3 [helio1,99]

12.4 Versuchsaufbau A 4

Benötigte Komponenten:

- Brennstoffzellenstack
- Elektronische Last
- Wasserstoffversorgung mit Druckminderer
- Durchflussmesser
- Lüfterstromversorgung
- Gleichspannungswandler
- Strommessgerät
- Spannungsmessgerät
- Temperaturmessgerät

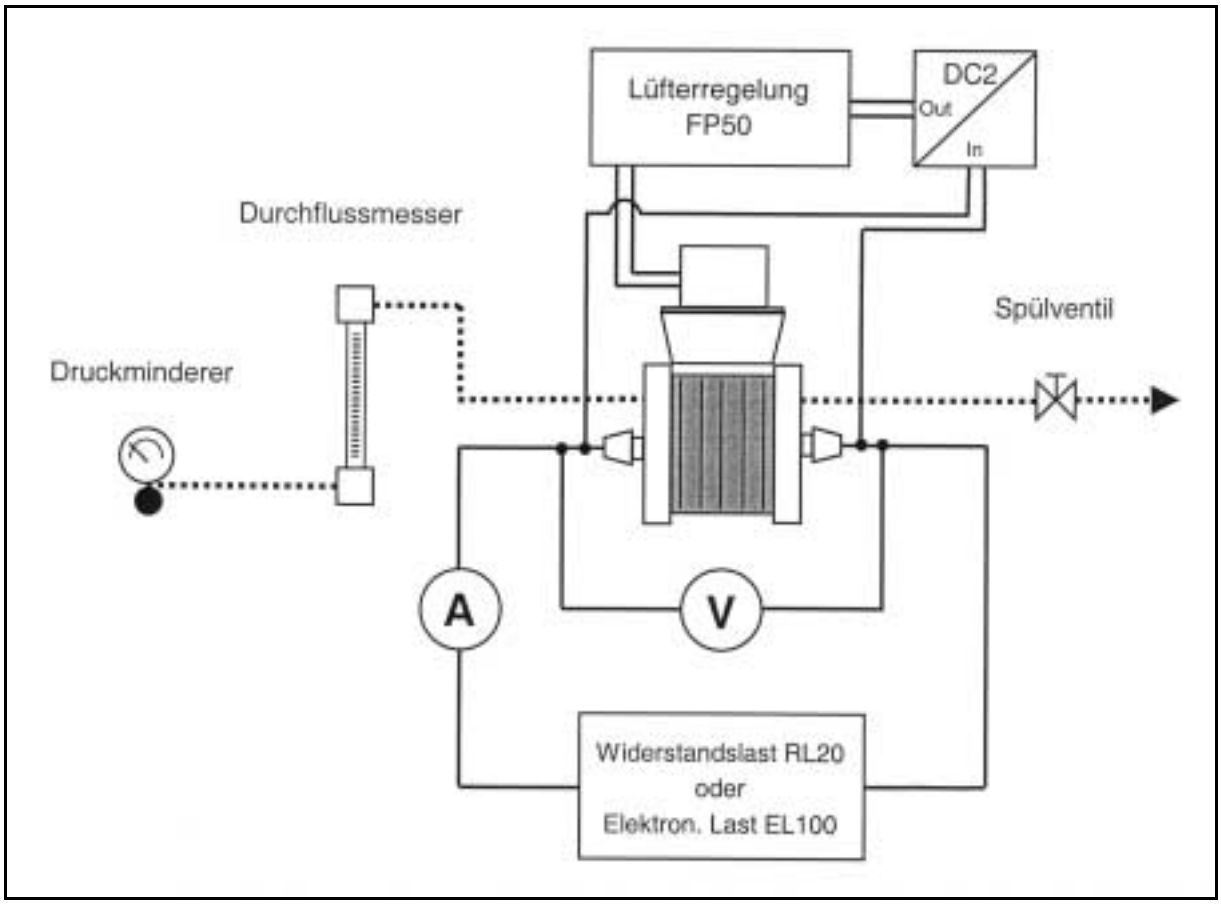

Abbildung 12.4: Versuchsaufbau A 4 [helio1,99]

12.5 Durchfluss-Diagramm

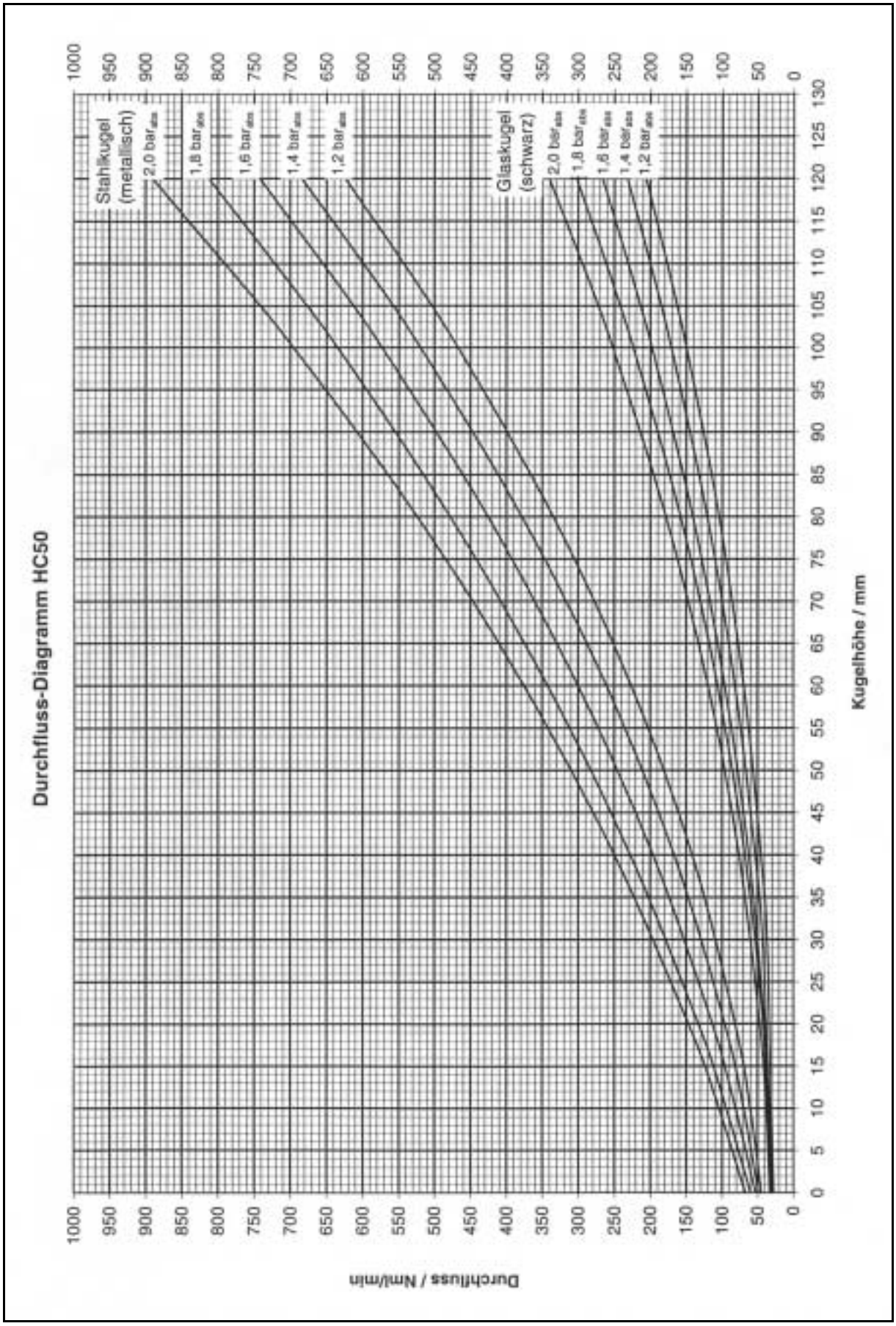

Abbildung 12.5: Durchfluss-Diagramm [helio1,99]